

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

3(84) 2024

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

БОЛОТОВ С. В., ЮМАНОВ Д. Н., ФУРМАНОВ С. М., ШЕРСТОБИТОВ А. С., НИКИТЕНКО Е. П. Технология контактной рельефной сварки держателей термодпар.....	5
КОРОТЕЕВ А. О., ФЕТИСОВА Е. А. Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды Ar + CO ₂ галогенидом SF ₆	14
КУЛЬГЕЙКО М. П., СИМАНОВИЧ Н. М., КУЛЬГЕЙКО Г. С. Параметрические диапазоны работы технологического модуля совмещенной магнитно-электрической обработки.....	26
ЛЕОНОВИЧ И. А., АДИНЦОВ Д. Д. Результаты экспериментального определения механических свойств ABS-пластика и их теоретическое подтверждение на компьютерной модели.....	34
ПОЛТОРАЦКИЙ С. Г., ШЕМЕНКОВ В. М. Моделирование процесса формирования гранных отверстий специальным осевым инструментом.....	42
ПОПКОВСКИЙ В. А., АЛЬХИМОВИЧ А. В. Напряженно-деформированное состояние шкива и полового вала при использовании горячей посадки.....	51

ФЕДОСЕНКО А. С., ЛОВШЕНКО Ф. Г., БЕЛЯКОВИЧ В. А.,
АНДРЕЕВ И. К., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С. Металлокерамические
порошки, полученные способом механического легирования,
и плазменные покрытия из них..... 61

ФУРМАНОВ С. М., ЮМАНОВ Д. Н., СЕРГЕЙЧИК А. О.,
БОЛОТОВ С. В., МИХАЛЮТО А. Д. Разработка программных
средств системы адаптивного регулирования мощности в процес-
се рельефной сварки..... 72

ЮМАНОВА А. Н., ШЕМЕНКОВ В. М. Имитационное модели-
рование воздействия тлеющего разряда различной частоты горе-
ния на поверхностный слой упрочняемых изделий..... 81

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПАНТЮШИНА В. Г., НОВИКОВ В. А. Экспериментальное
исследование формирования магнитостатического поля на поверх-
ности стыкового сварного соединения, выполненного на остающей-
ся подкладке..... 91

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКОЛОГИЯ

ЩУР А. В., ШИЛОВА И. В., РОМАНОВ М. В.,
АЛЕКСАНДРОНЕЦ А. А. Внутриофисное вертикальное озеле-
нение..... 101

МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА

ШИРОЧЕНКО В. А. Автоматизированная система расчета, рас-
пределения и анализа учебной нагрузки кафедры вуза..... 111

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

BOLOTOV S. V., YUMANOV D. N., FURMANOV S. M., SHERSTOBITOV A. S., NIKITENKO E. P. Technology of resistance projection welding of thermocouple holders.....	5
KARATSEYEU A. O., FIATSIŠAVA E. A. Features of transfer of alloying elements through the arc gap under conditions of modification of Ar + CO ₂ protective gas environment with SF ₆ halogenide.....	14
KULGEYKO M. P., SIMANOVICH N. M., KULGEYKO G. S. Parametric operating ranges of the technological module for combined magneto-electric processing.....	26
LEANOVICH I. A., ADZINTSOU D. D. Results of experimental determination of mechanical properties of ABS-plastic and theoretical confirmation of them on a computer model.....	34
PALTARATSKI S. G., SHEMENKOV V. M. Modeling the process of forming faceted holes with a special axial tool.....	42
POPKOVSKY V. A., ALKHIMOVICH A. V. Stress-strain state of a pulley and hollow shaft when using hot fitting.....	51
FEDOSENKO A. S., LOVSHENKO F. G., BELYAKOVICH V. A., ANDREYEV I. K., OLIENTSEVICH A. S. Metal-ceramic powders produced by mechanical alloying and plasma coatings made of them.....	61
FURMANOV S. M., YUMANOV D. N., SERGEYCHIK A. O., BOLOTOV S. V., MIKHALYUTO A. D. Development of adaptive power control software in projection welding process.....	72
YUMANOVA H. M., SHEMENKOV V. M. Simulation modeling of the impact of a pulsed glow discharge on the surface layer of strengthened products.....	81

INSTRUMENT MAKING

PANTYUSHINA V. G., NOVIKOV V. A. Experimental study of the formation of magnetostatic field on the surface of a butt-welded joint made on an unremoved backing strip.....	91
--	----

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. ECOLOGY

SHCHUR A. V., SHILOVA I. V., ROMANOV M. V., ALEXANDRONETS A. A. In-door office vertical gardening.....	101
---	-----

MATHEMATICS. COMPUTER SCIENCE

SHIROCHENKO V. A. Automated system for calculating, distributing and analyzing academic load at a university department..... 111

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-5-13

УДК 621.791

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

С. М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук, доц.

А. С. ШЕРСТОБИТОВ

Е. П. НИКИТЕНКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ДЕРЖАТЕЛЕЙ ТЕРМОПАР

Аннотация

Представлены результаты исследования по разработке технологии контактной рельефной сварки держателей термопар на основе разъемов плоских РПИ-М из латуни марки Л63 к хомутовой ленте из нержавеющей стали AISI 410. Разработана установка для реализации технологии контактной рельефной сварки на основе конденсаторной машины МТК-1601, обеспечивающая управление энергией, выделяемой в межэлектродной зоне, что позволяет обеспечить качество сварного соединения на энергосберегающих режимах сварки. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW, выполняющий контроль параметров режима и программное управление циклом сварки.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, технология сварки, установка, энергия в межэлектродной зоне, термопара.

Для цитирования:

Технология контактной рельефной сварки держателей термопар / С. В. Болотов, Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, А. С. Шерстобитов, Е. П. Никитенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 5–13.

Введение

Сварка разнородных материалов при помощи контактной рельефной сварки на сегодняшний день является актуальной и востребованной задачей, в особенности при получении неразъемных соединений и узлов в области изделий электротехнического назначения. Как правило, сварка разнородных материалов и изделий с наличием покрытия на поверхности требует повышенного внимания к технологическому процессу, а также к параметрам режима

сварки. Использование некорректно определенных параметров процесса сварки приводит к появлению недопустимых дефектов сварных соединений, а также искажению параметров электрической проводимости контактных элементов, что существенно снижает эксплуатационные характеристики изделий электротехнического назначения.

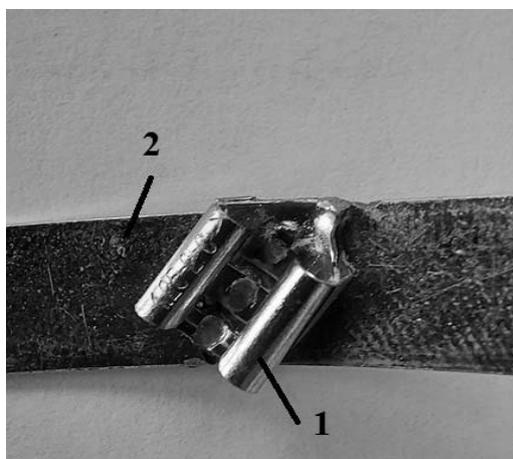
Основная трудность сварки разнородных материалов заключается в резком отличии их теплофизических и химических свойств. В процессе форми-

рования литого ядра сварного соединения при сварке разнородных материалов могут образовываться хрупкие интерметаллидные фазы, приводящие к снижению механических характеристик соединений. К наиболее выраженным проблемам также относят и смещение литого ядра в сторону металла с более высокими теплофизическими свойствами [1, 2].

Объектом исследований выступает контактный держатель термопары 3, который является соединением плоского изолированного разъема РПИ-М из латуни марки Л63 с электролитическим лужением, а также хомутной ленты 2 из нержавеющей стали AISI 410 (рис. 1). Высокотеплопроводный сплав меди и цинка Л63 обладает относительно высокой прочностью, хорошей свариваемостью благодаря однофазной структуре, а также высокими показателями

стойкости против коррозии. Нержавеющая сталь AISI 410, используемая для хомутной ленты, также обладает коррозионной стойкостью, жаропрочностью и высоким показателем ударной вязкости. Толщина элементов контактного держателя находится в диапазоне 0,5...1,0 мм – изолированный разъем $\delta_1 = 0,8$ мм, хомутная лента $\delta_2 = 0,6$ мм. На поверхности контактного держателя выполняется рельефный элемент диаметром 2 мм и высотой 1,0 мм в месте контактирования деталей между собой. Эффективным решением задачи сварки разнородных материалов разной толщины является использование различных подкладок и защитных экранов, однако в данном случае использование их затруднительно по причине геометрических особенностей исследуемого контактного держателя термопары.

а)



б)

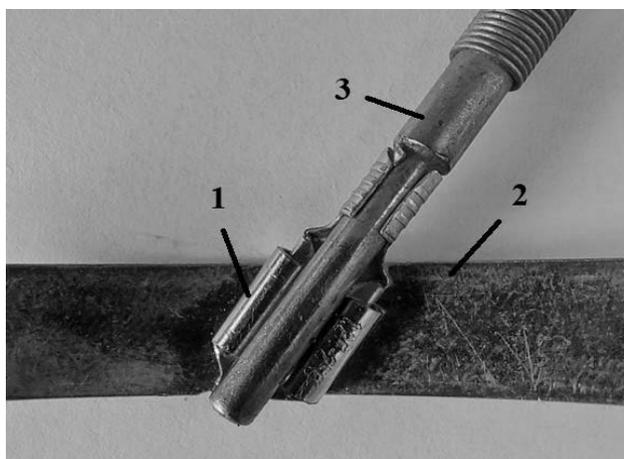


Рис. 1. Держатель термопары: а – соединение плоского изолированного разъёма 1 и хомутной ленты 2; б – крепление термопары 3

Держатель термопары входит в состав автоматизированной системы регистрации сварочных процессов РСП-БРУ-01 [3]. С помощью хомутной ленты на трубах диаметром от 89 до 325 мм на расстоянии 50...100 мм от сварного шва на равном удалении друг от друга крепится шесть термопар

ТХА(К)-1199/-/51/-1/2/20/3/-/27, обеспечивающих контроль температуры предварительного нагрева и температуры околосварочной зоны в процессе дуговой сварки.

Рекомендуемыми параметрами процесса сварки изделий из латуни и нержавеющей стали при контактной

сварке на однофазной машине переменного тока могут быть $I_{св} = 9...12$ кА, $\tau_{св} = 0,16...0,26$ с, $F_{св} = 1,5...1,7$ кН [4]. Однако эти параметры процесса являются в большей степени рекомендательными. На практике же следует подбирать их в зависимости от геометрических особенностей сварного соединения. Для предотвращения выплесков необходимо обеспечить плавное приложение импульсов сварочного тока, возможно проводить сварку по циклограмме с постоянным усилием сжатия при подогреве, сварке, проковке. С целью повышения прочностных характеристик рельефную сварку латуни Л63 и нержавеющей стали AISI 410 возможно осуществлять с использованием нескольких импульсов сварочного тока $I_{св}$.

При получении сварных соединений разнородных материалов способом контактной рельефной сварки наблюдается получение 80 % площади соединения от площади основания контакта, причем качественное и высокопрочное соединение может образовываться как с наличием расплавления, так и без него. Как правило, область сварного соединения из-за различия свойств свариваемых материалов может представлять собой четкую границу в виде линии или прослойки из непрерывного ряда кристаллов. Литое ядро образуется в виде столбчатых кристаллов, при увеличении времени нагрева оно может достигать всей толщины более тонкого изделия. С целью предотвращения возможного выхода литого ядра на поверхность детали и прилипания к поверхности электрода следует ограничивать количество теплоты, вводимое в зону соединения [6].

В связи с относительно небольшой толщиной свариваемых деталей с целью корректного задания параметров режима сварки и предупреждения появления выплеска или перегрева изделий применяется способ конденсаторной контактной рельефной сварки. Применение

конденсаторной сварки также обусловлено и использованием разнородных материалов, где строгое соблюдение и отслеживание параметров режима сварки является важным условием получения качественного соединения.

Экспериментальная установка

Одним из возможных решений может стать использование оборудования для конденсаторной сварки с применением современных средств управления и контроля сварочного цикла. Создание таких систем управления сталкивается соопределёнными трудностями: сложным взаимодействием между основными и сопутствующими процессами, протекающими в сварном соединении; кратковременным протеканием сварочного тока, соизмеримым с миллисекундами; другие факторы. Для обеспечения экспериментального исследования различных циклограмм и схем активного контроля точечных сварных соединений целесообразным решением является применение современных микропроцессорных средств, при этом необходимо по максимуму использовать возможности программного обеспечения, которое предоставляет гибкость и минимальные затраты при изменении схемы регулирования [7].

Разработанная система программного управления машиной конденсаторной сварки МТК-1601 призвана заменить устаревшую аппаратуру на базе «Логики-Т» [8]. Функциональная схема управления конденсаторной машиной МТК-1601 представлена на рис. 2.

Питание машины конденсаторной сварки осуществляется от сети переменного тока 380 В через магнитный пускатель КМ1 посредством трансформатора TV1. Зарядка батареи конденсаторов С производится от мостового выпрямителя, собранного на диодах VD1, VD2, VD3, VD4, через органичи-

вающие ток резисторы R1, R2. Включение цепи зарядки осуществляется тиристором VS2. При достижении заданного напряжения на батарее конденсаторов U_c через тиристор VS1 включается цепь шунтирования выпрямителя. Разряд батареи конденсаторов

на первичную обмотку сварочного трансформатора TV2 выполняется включением IGBT-транзистора VT1. Для защиты транзистора от перенапряжений используется обратный диод VD1.

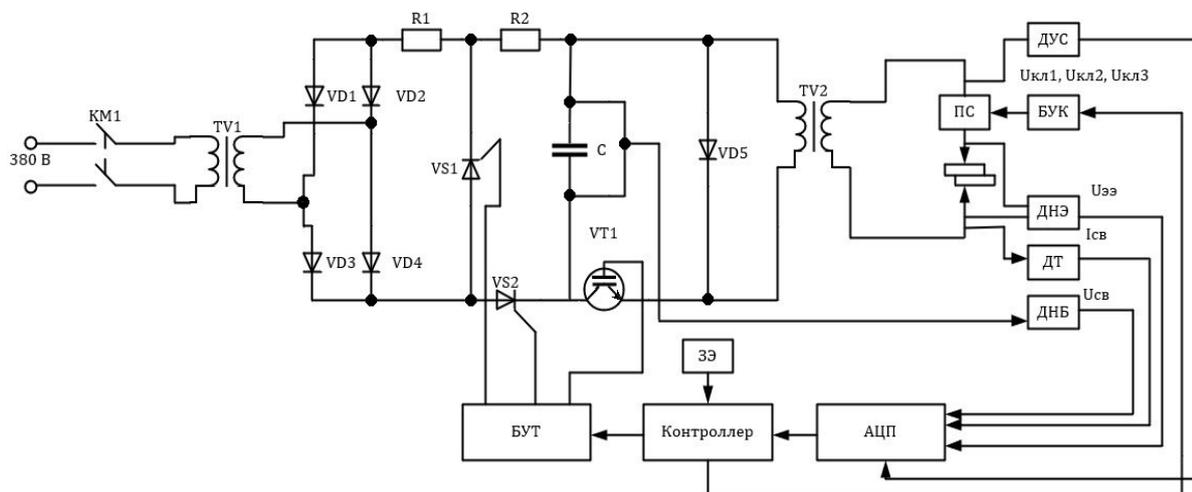


Рис. 2. Функциональная схема управления конденсаторной машиной МТК-1601: ПС – привод сжатия; БУК – блок управления клапанами; ДУС – датчик усилия сжатия электродов; ДНЭ – датчик напряжения между электродами; ДТ – датчик тока; ДНБ – датчик напряжения батареи; БУТ – блок управления тиристорами и транзистором; ЗЭ – задатчик энергии; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; TV1 – трансформатор питания; TV2 – трансформатор сварочный; KM1 – магнитный пускатель; R1, R2 – ограничивающие ток сопротивления; VS1 – шунтирующий тиристор; VS2 – зарядный тиристор; VT1 – разрядный транзистор; C – батарея конденсаторов; VD1, VD2, VD3, VD4 – диоды-выпрямители; VD5 – обратный диод

Главным элементом системы управления машиной конденсаторной сварки является контроллер STM32, который осуществляет подачу открывающих импульсов на тиристоры VS1, VS2 и транзистор VT1 через блок управления тиристорами и транзистором БУТ. Управление клапанами пневматического привода сжатия ПС машины контроллер производит через блок управления БУК. Клапан 1 обеспечивает сжатие электродов, клапан 2 – расжатие и клапан 3 – ковочное (повышенное) усилие. Контроль напряжения на батарее конденсаторов U_c выполняет датчик напряжения ДНБ, напряжения между электродами $U_{ээ}$ – датчик ДНЭ, а усилия сжатия электродов – датчик ДУС на основе тензорезисторов. Контроль тока $I_{св}$ производится датчиком ДТ, представляющим

пояс Роговского. Сигналы с датчиков поступают на контроллер через внешний аналого-цифровой преобразователь АЦП.

Задание требуемого сварочного цикла обеспечивается определённым сочетанием из шести управляющих импульсов, которые отвечают за работу трёх пневматических клапанов, двух тиристоров (зарядного и шунтирующего) и разрядного транзистора. Пневматические клапаны привода сжатия предоставляют возможности по разведению токоведущих электродов, сжатую свариваемых деталей и приложению повышенного усилия сжатия за счет задействования вспомогательного поршня пневматического привода. Управление всеми перечисленными рабочими органами конденсаторной машины осуществляется посредством

цифровых сигналов контроллера.

Для программной реализации системы управления процессом сварки на конденсаторной машине и задания циклограммы её работы было использовано программное обеспечение NI LabVIEW, представляющее собой среду прикладного графического программирования и предназначенное для

создания так называемых виртуальных приборов – программ, написанных в среде LabVIEW [9]. Блок-диаграмма и лицевая панель, являясь основными компонентами виртуального прибора, заключают в себе функции алгоритма программы и пользовательского интерфейса (рис. 3) [10].



Рис. 3. Лицевая панель виртуального прибора системы управления

Система управления обеспечивает выполнение как одноимпульсного, так и двухимпульсного режима сварки (см. рис. 3) с заданием величины напряжения на конденсаторной батарее U_{c1} и U_{c2} , времени предварительного сжатия, паузы и проковки. Предусмотрен тумблер для расжатия электродов и включения проковки (ковочного усилия $F_{ков}$). Запуск цикла сварки осуществляется при нажатии кнопки «Сварка» на панели виртуального прибора.

На панели «Индикация» производится включение светодиодов при прохождении соответствующей позиции цикла: сжатие, заряд, шунтирование, предварительное сжатие, сжатие, разрядный ток, проковка, пауза.

Разработана плата, обеспечивающая работу БУК и БУТ. Цифровые сигналы управления с контроллера усиливаются с помощью ключей на биполярных транзисторах КТ972Б, обеспечивая формирование напряжений для

управления клапанами привода сжатия ПС и тиристорами заряда, шунтирования и транзистором разряда.

Напряжение батареи конденсаторов (0...500 В) снимается с делителя напряжений, а напряжение между электродами (0...10 В) непосредственно подается на АЦП контроллера. Сварочный ток с пояса Роговского через интегрирующее устройство поступает на вход АЦП. Проведена калибровка датчиков напряжения, тока и усилия сжатия электродов.

Результаты исследований

Сварку образцов держателей термодержателей выполняли на разработанной установке.

Перед сваркой на поверхности плоского изолированного разъема РПИ-М из латуни марки Л63 в его центральной части (см. рис. 1) изготавливали рельефный элемент диаметром 2 мм и высотой 1,0 мм.

Сварку плоского изолированного разъема РПИ-М и хомутовой ленты из

нержавеющей стали AISI 410 выполняли при изменении параметров режима конденсаторной сварки: напряжение конденсаторной батареи C_p (1920 и 3200 мкФ); коэффициент трансформации K_T (30; 60); усилие сжатия электродов $F_{сж}$ (1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 кгс); напряжение конденсаторной батареи U_c (180...320 В).

На рис. 4 представлены осциллограммы сварочного тока $i_{св}$, напряжения между электродами $u_{ээ}$, мощности в межэлектродной зоне $p_{ээ}$ при сварке держателей термодержателей на следующих режимах: напряжение конденсаторной батареи $C_p = 3200$ мкФ; коэффициент трансформации $K_T = 60$; усилие сжатия электродов $F_{сж} = 2,5$ кгс; напряжение конденсаторной батареи $U_c = 260$ В. Мощность $p_{ээ}$ определяется программно, как произведение сварочного тока $i_{св}$ на напряжение между электродами $u_{ээ}$. Расчёт выделяемой энергии в межэлектродной зоне $Q_{ээ}$ производится суммированием произведений мощности $p_{ээ}$ при каждом измерении на интервал времени Δt между измерениями.

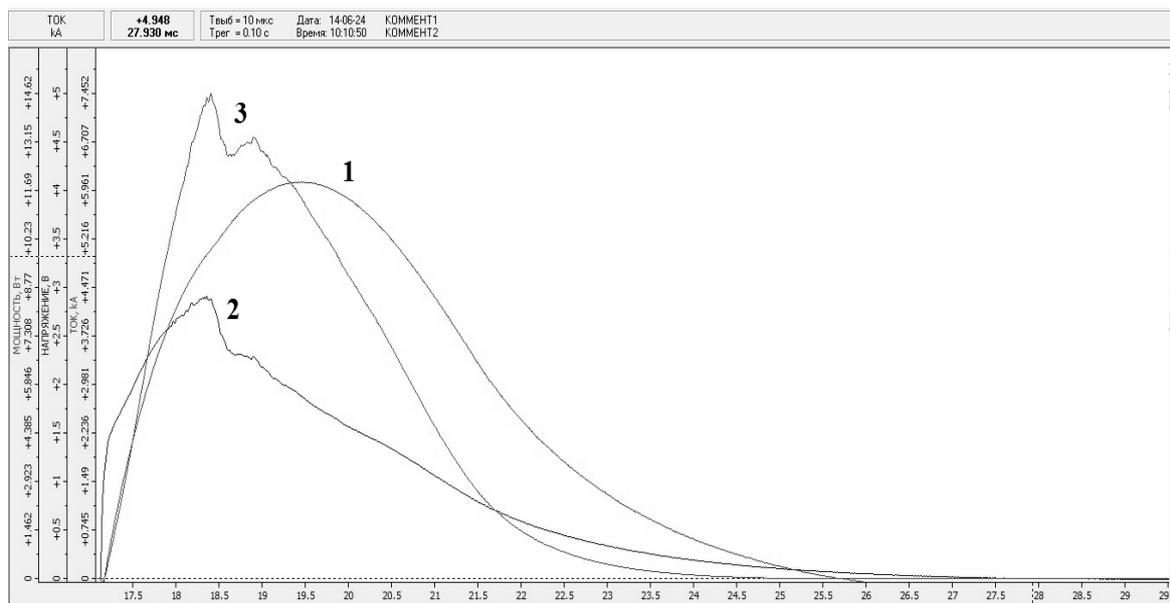


Рис. 4. Графики изменения параметров режима сварки: 1 – сварочного тока $i_{св}$; 2 – напряжения между электродами $u_{ээ}$; 3 – мощности в межэлектродной зоне $p_{ээ}$

Испытания на срез сварных соединений выполнялись на машине разрывной KASON WDW-5. Определялось максимальное усилие разрыва $F_{ср}$. На

рис. 5 представлены внешний вид образца для испытаний на срез сварной точки и вид образца после разрушения.



Рис. 5. Образец для испытания на прочность и вид образца после разрушения

Установлено, что максимальное усилие на срез клеммы для крепления термопары относительно хомутной ленты $F_{ср} = 290$ Н обеспечивается при сварке с усилием сжатия электродов $F_{сж} = 2,5$ кгс, напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 260$ В, ёмкости батареи $C_p = 3200$ мкФ и коэффициенте трансформации $K_T = 60$ (рис. 6). При уменьшении усилия сжатия до $F_{сж} = 2,0$ кгс $F_{ср}$ снижается на 4,1 % при напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 260$ В и на 2,0 % при уменьшении напряжения на батарее конденсаторов до $U_c = 250$ В. Снижение усилия сжатия до $F_{сж} = 1,5$ кгс при напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 250$ В приводит к снижению максимального усилия на срез на 13,8 %. При снижении напряжения на батарее конденсаторов U_c до 210 В максимальное усилие на срез снижается до 216...225 Н, но при этом повышается вероятность образования непровара из-за недостаточного количества накопленной энергии. Увеличение напряжения на батарее конденсаторов U_c более 260 В приводит к повышению значения накопленной энергии и снижению прочности сварного соединения, особенно при усилии сжатия электродов $F_{сж}$ менее 2,0 кгс. При $U_c > 300$ В наблюдаются выплески расплавленного металла. Снижение ёмкости аккумуляторной батареи C_p не целесообразно,

т. к. приводит к уменьшению максимального сварочного тока, размеров зоны взаимного расплавления свариваемых деталей и максимального усилия на срез $F_{ср} < 200$ Н. Уменьшение коэффициента трансформации K_T с 60 до 30 также не целесообразно, т. к. увеличивается скорость нарастания энергии, вводимой в межэлектродную зону, что повышает вероятность образования выплесков расплавленного металла.

Испытания на срез образцов, сваренных при ёмкости батареи конденсаторов $C_p = 3200$ мкФ, коэффициенте трансформации $K_T = 60$, усилии сжатия электродов $F_{сж} = 2,0...2,5$ кгс, напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 250...260$ В, показали, что разрушение образца происходит с вырывом металла хомутной ленты, максимальное усилие на срез при этом составляет $F_{ср} = 277...290$ Н (см. рис. 6). Данные режимы сварки позволяют обеспечить максимальную прочность сварного соединения при минимальном потреблении запасённой на батарее конденсаторов энергии.

Установлено, что максимальное значение энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, для энерго-сберегающего процесса контактной рельефной сварки при напряжении $U_c = 250...260$ В не должно превышать

$Q_{\text{эз}} = 10,9$ Дж при максимальной мощности $P_{\text{max}} = 14,4...14,6$ Вт на батарее

конденсаторов емкостью $C_p = 3200$ мкФ.

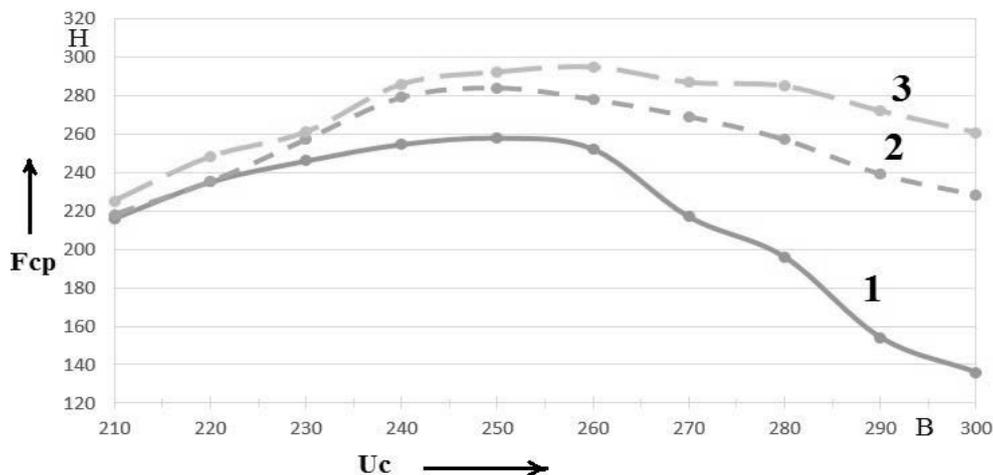


Рис. 6. Зависимость максимального усилия на срез сварной точки F_{cp} от напряжения на конденсаторной батарее U_c для различных усилий сжатия электродов: 1 – $F_{сж} = 1,5$ кгс; 2 – $F_{сж} = 2,0$ кгс; 3 – $F_{сж} = 3,0$ кгс

Использование IGBT-транзистора VT1 (см. рис. 2) вместо разрядного тиристора позволяет осуществлять управление скоростью изменения сварочного тока (мощностью) за счёт широтно-импульсной модуляции на частоте до 50 кГц, а также дозировать значение энергии $Q_{\text{эз}}$, вводимой в межэлектродную зону.

Заключение

1. Сварку изолированного разъема РПИ-М из латуни марки ЛБЗ и хомутной ленты из нержавеющей стали AISI 410 контактного держателя терморпары следует выполнять на энергосберегающих режимах контактной рельефной сварки: ёмкость батареи конденсаторов $C_p = 3200$ мкФ; коэффициент трансформации $K_T = 60$; усилие сжатия электродов $F_{сж} = 2,0...2,5$ кгс; напряжение на батарее конденсаторов $U_c = 250...260$ В.

2. Разработана установка на основе машины конденсаторной сварки МТК-1601, позволяющая осуществлять программное управление циклом

сварки с контролем сварочного тока, напряжения между электродами, усилия сжатия электродов и вычисляемыми на их основе мощностью и энергией $Q_{\text{эз}}$, вводимой в межэлектродную зону. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW, реализующий сбор данных о процессе сварки и управление циклом сварки на конденсаторной машине.

3. Использование IGBT-транзистора в разрядной цепи машины конденсаторной сварки позволяет осуществлять управление величиной энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, и скоростью её нарастания (мощностью), что дает возможность обеспечить высокое качество сварных соединений. Установлено, что максимальное значение энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, для энергосберегающего процесса контактной рельефной сварки при напряжении $U_c = 250...260$ В не должно превышать $Q_{\text{эз}} = 10,9$ Дж при максимальной мощности $P_{\text{max}} = 14,4...14,6$ Вт на батарее конденсаторов емкостью $C_p = 3200$ мкФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением: учебное пособие / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
2. **Гуляев, А. И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве / А. И. Гуляев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 246 с.: ил.
3. **Болотов, С. В.** Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки / С. В. Болотов, К. В. Захарченков, В. П. Куликов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 3 (80). – С. 144–152.
4. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 152 с.: ил.
5. **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 240 с.: ил.
6. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2011. – 216 с.
7. Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
8. **Белов, А. Б.** Конденсаторные машины для контактной сварки / А. Б. Белов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
9. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе Lab VIEW 7 / Под ред. П. А. Бутырина. – Москва: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
10. **Курлович, И. В.** Программная реализация управления контактной сваркой на конденсаторной машине / И. В. Курлович, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4 (41). – С. 35–46.

Статья сдана в редакцию 13 июня 2024 года

Контакты:

s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
oitsp.dmitriy.y@gmail.com (Юманов Дмитрий Николаевич);
pochta_furm@mail.ru (Фурманов Сергей Михайлович);
sherstobitov_lip@mail.ru (Шерстобитов Артём Сергеевич);
ep_nikitenko@mail.ru (Никитенко Егор Петрович).

***S. V. BOLOTOV, D. N. YUMANOV, S. M. FURMANOV, A. S. SHERSTOBITOV,
E. P. NIKITENKO***

TECHNOLOGY OF RESISTANCE PROJECTION WELDING OF THERMOCOUPLE HOLDERS

Abstract

The paper presents the research results on developing the technology of resistance projection welding of thermocouple holders based on flat RPI-M connectors made of L63 brass to a clamp tape made of AISI 410 stainless steel. An installation has been developed to implement resistance projection welding technology based on the MTK-1601 capacitor machine, which provides control of the energy released in the interelectrode zone, thus ensuring the quality of the welded joint in the energy-saving welding modes. A virtual device has been developed in the LabVIEW environment, which monitors mode parameters and performs software control of the welding cycle.

Keywords:

resistance projection welding, welding technology, installation, energy in the interelectrode zone, thermocouple.

For citation:

Technology of resistance projection welding of thermocouple holders / S. V. Bolotov, D. N. Yumanov, S. M. Furmanov, A. S. Sherstobitov, E. P. Nikitenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 5–13.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-14-25

УДК 621.791.763.2

А. О. КОРОТЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

Е. А. ФЕТИСОВА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЧЕРЕЗ ДУГОВОЙ ПРОМЕЖУТОК В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ $Ar + CO_2$ ГАЛОГЕНИДОМ SF_6

Аннотация

На основании экспериментальных исследований установлены закономерности изменения концентрации легирующих элементов присадочной проволоки в наплавленном металле, вызванного модификацией защитной газовой среды ($Ar + CO_2$) галогенидом SF_6 . Определены ключевые факторы, оказывающие влияние на переход элементов через дуговой промежуток, а также предложены подходы к объяснению металлургических процессов, происходящих в высокотемпературной области дугового промежутка. Исследования проведены для высокопрочной низколегированной проволоки, предназначенной для сварки сталей бейнитной структуры с термомеханическим упрочнением.

Ключевые слова:

переход легирующих элементов, дуговая наплавка, сварка, модификация защитной газовой среды, гексафторид серы.

Для цитирования:

Коротеев, А. О. Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды $Ar + CO_2$ галогенидом SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 14–25.

Введение

Высокопрочные стали являются эффективным материалом для создания нагруженных элементов металлоконструкций, снижения металлоемкости при обеспечении требуемой несущей способности изделий, непосредственно воспринимающих рабочие нагрузки. Современные высокопрочные стали, используемые для изготовления сварных металлоконструкций, как правило, относятся к низколегированным низкоуглеродистым материалам. При этом высокие прочностные показатели обеспечиваются комплексной системой легирования, обеспечивающей формирование требуемой микроструктуры в результате сложной термомеханической обработки (прокатки, с контролируемой скоростью охлаждения в горячем состоянии). Содержание же каждого элемента невелико и эффект упрочнения достигается путем создания комплексной системы

взаимодополняющих эффектов.

С точки зрения сварки, такие стали более предпочтительны, по сравнению с классическими высокопрочными материалами (низкоуглеродистые среднелегированные и среднеуглеродистые низколегированные стали), т. к. содержат небольшое количество углерода и легирующих элементов. Формируемая микроструктура обладает достаточным уровнем пластичности, что существенно упрощает технологию сварки и термической обработки, если она необходима.

Традиционно высокопрочные стали проявляют повышенную чувствительность к диффузионному водороду, что обусловлено его крайне низкой подвижностью в структурах мартенсита и бейнита. При неблагоприятном стечении обстоятельств это может вызывать появление трещин по замедленному механизму разрушения, инициированных повышением давления в микропустотах образующейся молекулярной формой

водорода. Особенно это актуально при наличии на поверхности свариваемых деталей адсорбированной влаги, повышенной влажности помещения и сварочных материалов, недостаточно качественной подготовки деталей под сварку. Ограничение содержания водорода в таких материалах является крайне важной задачей и реализуется на практике посредством различных подходов. В ряде статей нами предлагается для связывания водорода в нерастворимые в жидком металле соединения при сварке и наплавке в среде защитных газов использовать газообразный гексафторид серы SF_6 , галогенид, диссоциирующий при высоких температурах дугового промежутка [1–4] с образованием активных продуктов. В работах показана эффективность такого способа с точки зрения снижения количества водорода и особенности выбора значений параметров режима.

Переход расплавленного металла через дуговой промежуток сопровождается изменением его химического состава в силу высоких температур, металлургических реакций взаимодействия с защитной газовой атмосферой и др. Это вызывает необходимость учета потерь легирующих элементов при разработке сварочных материалов с целью обеспечения их требуемого состава в наплавленном металле. В противном случае, нарушение процентного содержания основных легирующих элементов может вызвать потерю эксплуатационных характеристик и снижение работоспособности соединения, что можно часто наблюдать в случае неправильного выбора материалов или защитной газовой среды. Модификация газовой атмосферы будет оказывать прямое воздействие на характер перехода элементов, особенно в случае введения активных компонентов, участвующих в металлургических реакциях на стадии капли в сильно перегретом состоянии. Этим вопросам посвящена данная статья.

Основная часть

Для оценки характера перехода легирующих элементов через дуговой промежуток нами проведена серия экспериментальных исследований, сущность которых заключалась в выполнении наплавки на пластины с использованием различных значений параметров режима и состава защитной газовой атмосферы ($Ar + CO_2 + SF_6$), и последующем спектральным оптико-эмиссионным анализом химического состава на установке SOLARIS GNR-SCP (рис. 1). Наплавка выполнялась на робототехническом комплексе в восемь слоев с регистрацией значений параметров режима системой РКДП-0401. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

При проведении экспериментов использовалась проволока ESAB ОК Aristorod 69 EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo, химический состав наплавленного металла которой представлен в табл. 1. Проволока предназначена для сварки низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести до 700 МПа в смеси M21 (82 % Ar + 18 % CO_2).

Основным параметром режима, оказывающим непосредственное влияние на переход элементов через дуговой промежуток, является напряжение на дуге (при заданных условиях технологического процесса значения силы тока). Это объясняется, в первую очередь, изменением времени контактирования расплавленного металла присадочной проволоки с омывающим его потоком защитного газа, т. к. повышение напряжения будет способствовать увеличению длины дуги и, как следствие, увеличению времени существования фазы ее горения между короткими замыканиями дугового промежутка. Ранее рассматривались особенности влияния напряжения на частоту этих замыканий в условиях модификации

защитной атмосферы галогенидом SF₆. В представленных исследованиях используется диапазон регулирования зна-

чений параметров режима в соответствии с полученными ранее результатами [1].

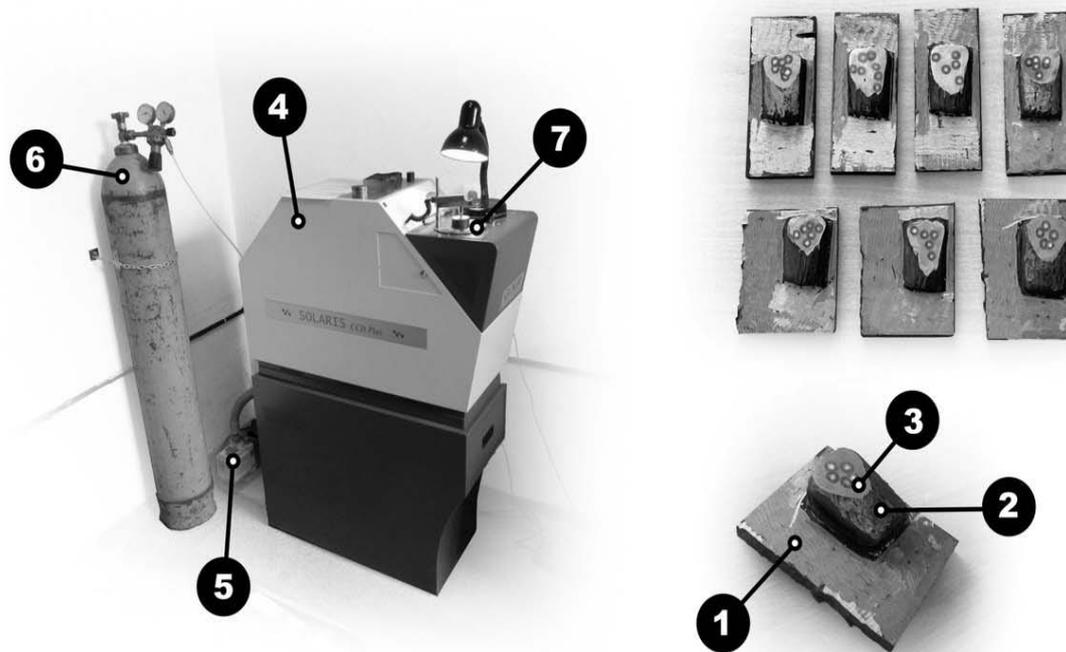


Рис. 1. Установка для проведения спектрального оптического эмиссионного анализа и внешний вид образцов: 1 – пластина для выполнения наплавки; 2 – наплавка; 3 – плоская площадка с отпечатками от проведения спектрального оптического эмиссионного анализа массовой доли элементов; 4 – спектрометр SOLARIS GNR-SCP; 5 – вакуумный насос; 6 – баллон с аргоном высокой чистоты; 7 – предметный столик с образцом для исследований

Табл. 1. Химический состав используемой проволоки

Содержание элемента, %											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Zr
0,10	0,40...0,70	1,5...1,8	0,015	0,015	0,2...0,4	1,2...1,6	0,2...0,3	0,15	0,05...0,1	0,1	0,1

В процессе выполнения наплавки производилась зачистка промежуточных слоев и выдерживалась температура остывания предыдущего слоя не выше 150 °С. После выполнения наплавки на ее поверхности методом фрезеровки выполнялась площадка площадью 140...160 мм² для размещения на рабочей поверхности спектрометра и проведения химического анализа.

Основными химическими элементами, представляющими интерес в данной работе, являются раскислители (Mn и Si), углерод (C), сера (S), являющаяся продуктом диссоциации SF₆ и вредной примесью для стали (см. табл. 1). Также оценка производилась по основным легирующим элементам (Cr, Ni, V, Mo, Ti). Однако, как и следовало ожидать, их процентное соотношение осталось прежним, что объясняется активностью

раскислителей и их достаточным количеством для подавления реакций окисления.

Результаты анализа содержания кремния и марганца в наплавленном металле в виде графических зависимостей представлены на рис. 2 и 3. Кривые на графиках представляют варианты наплавки с различной концентрацией SF_6 . Так как введение гаксафторида серы приводит к существенному изменению условий существования дугового промежутка, эксперименты проведены для различных диапазонов регулирования напряжения на дуге, что обусловлено необходимостью обеспечения стабильности протекания процесса (чем выше концентрация SF_6 , тем кривая сдвигается в область более высоких значений напряжения). Этот эффект был описан ранее в ряде публикаций [1].

В целом, необходимо отметить общее снижение процентного содержания кремния (Si) и марганца (Mn) в наплавленном металле для представленных случаев. В то же время анализ кривых для одного заданного значения напряжения свидетельствует о некотором росте концентрации каждого из них (кривые, приведенные рядом с графиками). Это объясняется тем, что в случае введения SF_6 в защитную газовую среду при сохранении значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге, во вновь сложившихся условиях последнее становится заниженным относительно оптимального, что в конечном счете приводит к уменьшению длины дуги и ее мощности, и, как следствие, к снижению времени контактирования расплавленного металла с омывающим его потоком защитной газовой смеси, что по естественным причинам снижает высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке.

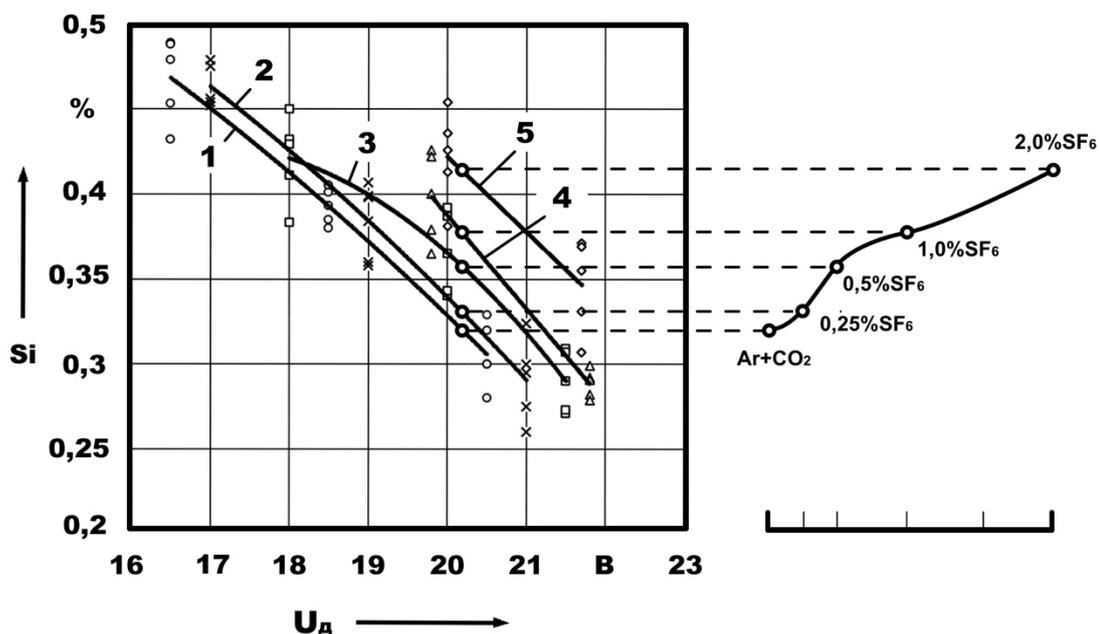
Роль кремния и марганца, как раскислителей, с введением SF_6 , по нашему мнению, заметно не повышается, что обусловлено относительным постоянством

окислительного потенциала защитной газовой атмосферы. При этом следует отметить, что концентрация кремния в наплавленном металле повышается более активно, по сравнению с марганцем, чье содержание практически остается постоянным. По-видимому, это объясняется частичным связыванием марганца с серой с образованием сульфидов MnS , что является положительным эффектом, но недостаточным для эффективной блокировки растворимости серы в наплавленном металле в рассматриваемых концентрациях. Возможно, в случае применения проволок с большим содержанием марганца этот эффект будет более явным, однако это требует проведения дополнительных исследований.

Результаты анализа содержания серы в наплавленном металле представлены на рис. 4.

Процентное содержание серы в наплавленном металле возрастает с повышением концентрации SF_6 в защитной газовой среде. Это является естественным, т. к. в высокотемпературной области защитной атмосферы вблизи дугового разряда повышается концентрация продуктов диссоциации SF_6 с образованием активных компонентов, способных вступать в реакции с расплавленным, сильно перегретым присадочным металлом в виде капли на торце плавящейся проволоки. Причем повышение напряжения приводит к более активному росту серы, что объясняется увеличением длины дуги и, как следствие, времени контактирования расплавленной капли с омывающим ее потоком защитной газовой смеси между короткими замыканиями дугового промежутка. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований частоты переноса электродного металла и особенностей плавления присадочной проволоки в условиях модификации защитной смеси SF_6 , полученные нами ранее [1].

a)



б)

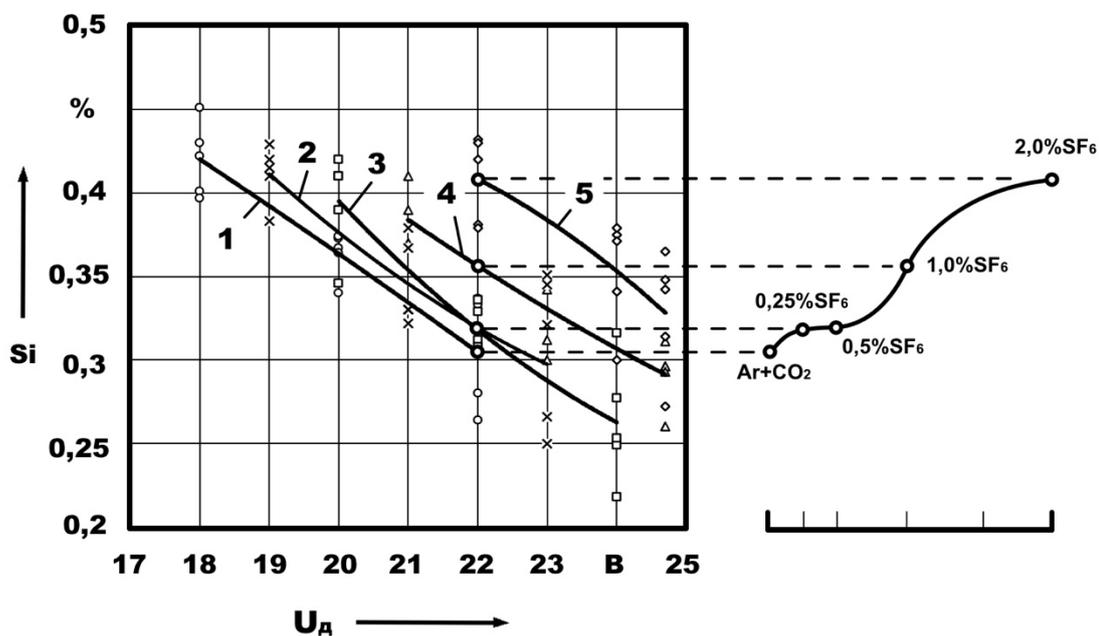
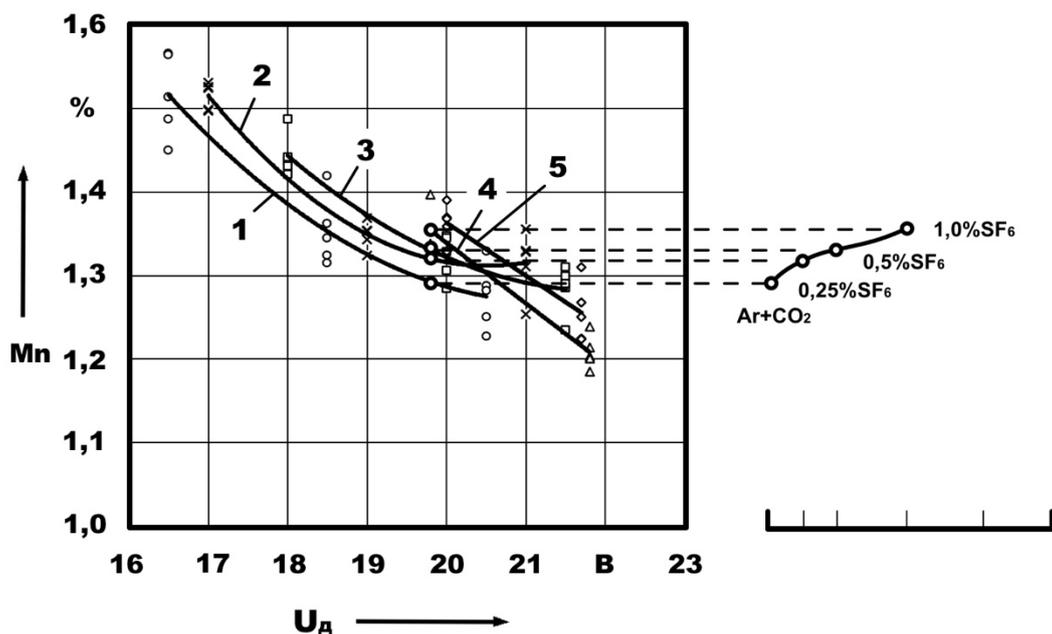


Рис. 2. Зависимость содержания кремния (Si) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: а - $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б - $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 4 - (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 5 - (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

a)



б)

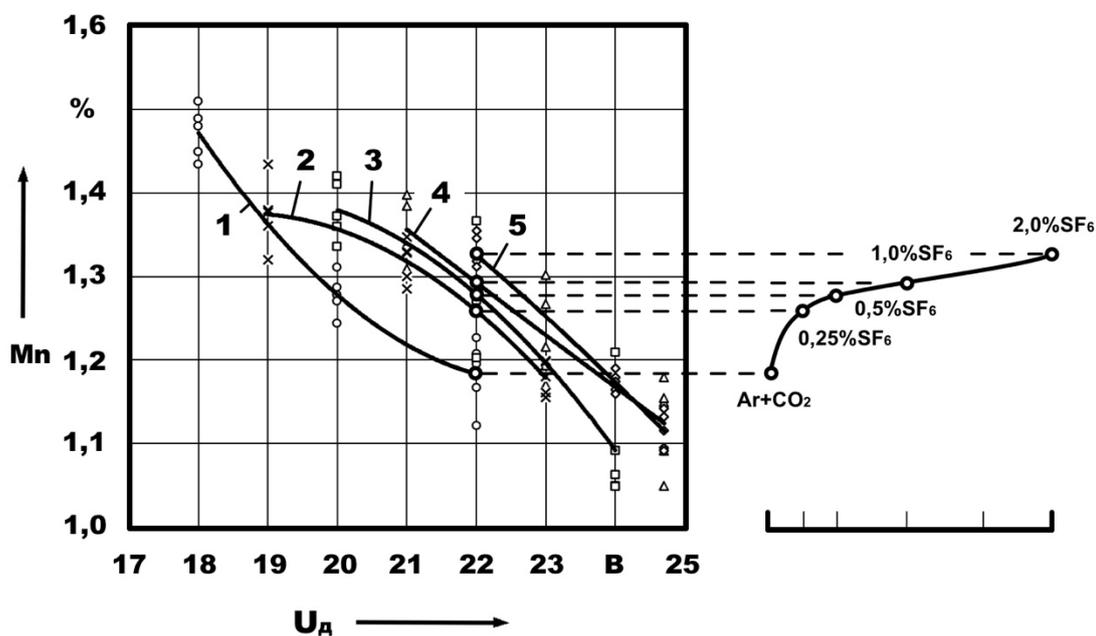
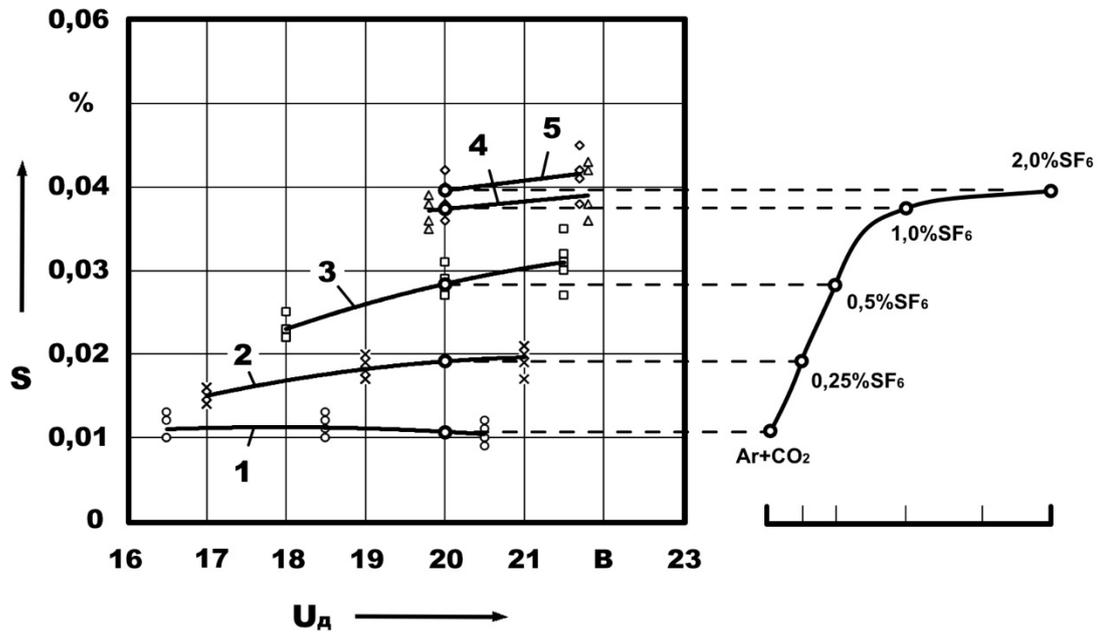


Рис. 3. Зависимость содержания марганца (Mn) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а - $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б - $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 - (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 3 - (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 4 - (Ar + CO_2) + 1 % SF_6 ; 5 - (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

а)



б)

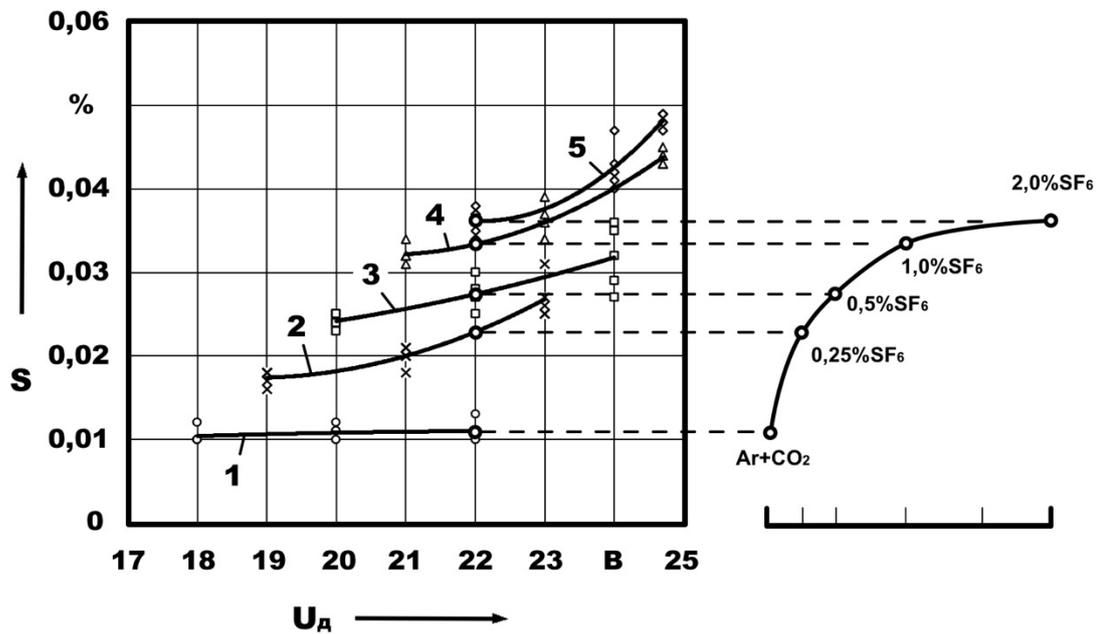


Рис. 4. Зависимость содержания серы (S) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а - $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б - $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 - (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 3 - (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 4 - (Ar + CO_2) + 1 % SF_6 ; 5 - (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

Напряжение на дуге практически не оказывает влияния на рост серы в наплавленном металле в случае применения в качестве защитной среды смеси $Ag + CO_2$ без SF_6 (см. рис. 2, кривые 4), т. к. отсутствует источник серы как таковой. Кроме того, в некоторых случаях можно заметить (см. рис. 4, а, кривая 1) некоторое его падение из-за естественных потерь в высокотемпературной области при повышенных напряжениях (свыше 19 В при скорости подачи присадочной проволоки 3,7 м/мин). В случае же повышения концентрации SF_6 влияние напряжения на дуге на количество серы в наплавленном металле становится все более явным. Угол наклона графиков к горизонтальной оси увеличивается. Следует отметить также, что несмотря на то, что сера является вредной примесью для большинства конструкционных материалов, введение до 0,5 % SF_6 не приводит к ее росту сверх недопустимых значений. Особенно эффективно применение пониженных напряжений, что позволяет снизить концентрацию серы до значений менее 0,025 %.

Анализ изменения содержания углерода в наплавленном металле представлен на рис. 5. Наблюдается снижение концентрации для всех используемых вариантов наплавки. Вероятной причиной этого является его взаимодействие с продуктами диссоциации SF_6 с образованием CF_4 . При этом концентрация углерода в случае введения до 2 % может быть снижена в 3 раза, что является существенным эффектом, т. к. углерод является важнейшим элементом, обеспечивающим комплекс эксплуатационных характеристик стали и особенностей поведения всей системы легирующих элементов.

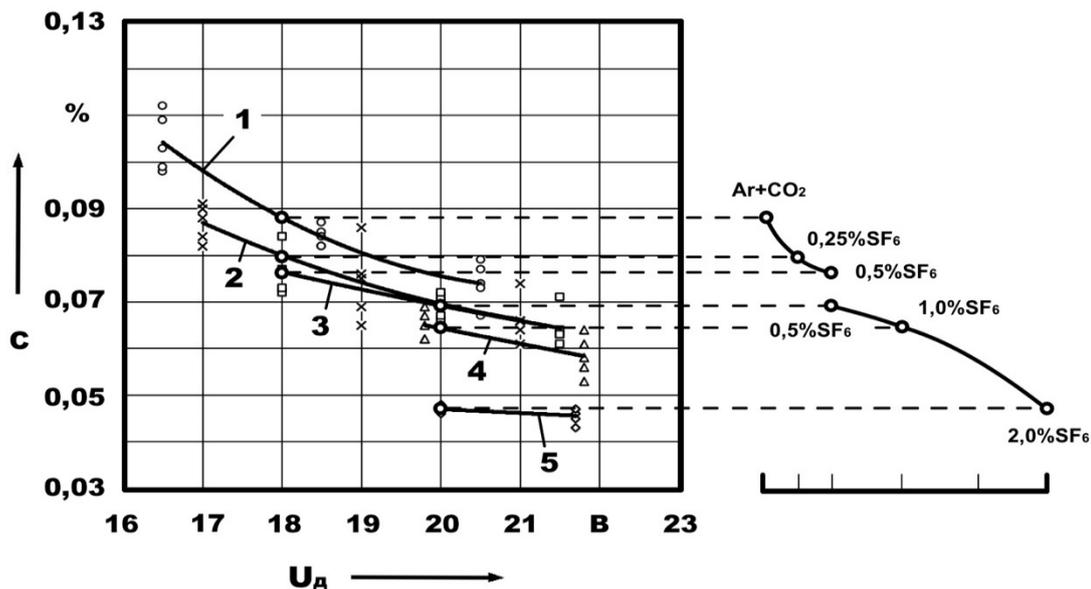
Важным вопросом, решение которого позволяет сформировать более комплексную картину поведения газовых компонентов в зоне горения дуги,

является влияние окислительного потенциала защитной среды на поведение SF_6 и переход серы в наплавленный металл. Наиболее эффективным механизмом в этом случае является управление соотношением Ag и CO_2 на первом этапе подготовки состава защитной атмосферы. Углекислый газ может взаимодействовать с продуктами диссоциации гексафторида серы. Кроме того, возможны непосредственные реакции с кислородом в ионизированном состоянии в высокотемпературной области.

Для анализа возможности изменения концентрации серы в наплавленном металле путем изменения количества углекислого газа в диапазоне регулирования 2 %...25 % нами проведена серия экспериментальных исследований. Результаты представлены на графиках рис. 6. На первом участке графиков (см. рис. 6) при содержании углекислого газа в защитной газовой смеси до 10 %...12 % наблюдается некоторый рост концентрации серы в наплавленном металле, что при сохранении остальных параметров постоянными обусловлено завышенным напряжением на дуге (значение выбиралось по содержанию 18 % CO_2).

По мере увеличения концентрации CO_2 в защитной атмосфере длина дуги уменьшается, что приводит к сокращению времени активного взаимодействия перегретой капли с омывающим потоком газа (содержащего гексафторид, являющийся источником серы). При значениях углекислого газа свыше 12 % наблюдается активное уменьшение количества серы, а это, по-видимому, обусловлено преобладающим эффектом взаимодействия углекислого газа с продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 , что оказывается более значимым на фоне уменьшающейся длины дуги, способствующей его некоторому росту.

а)



б)

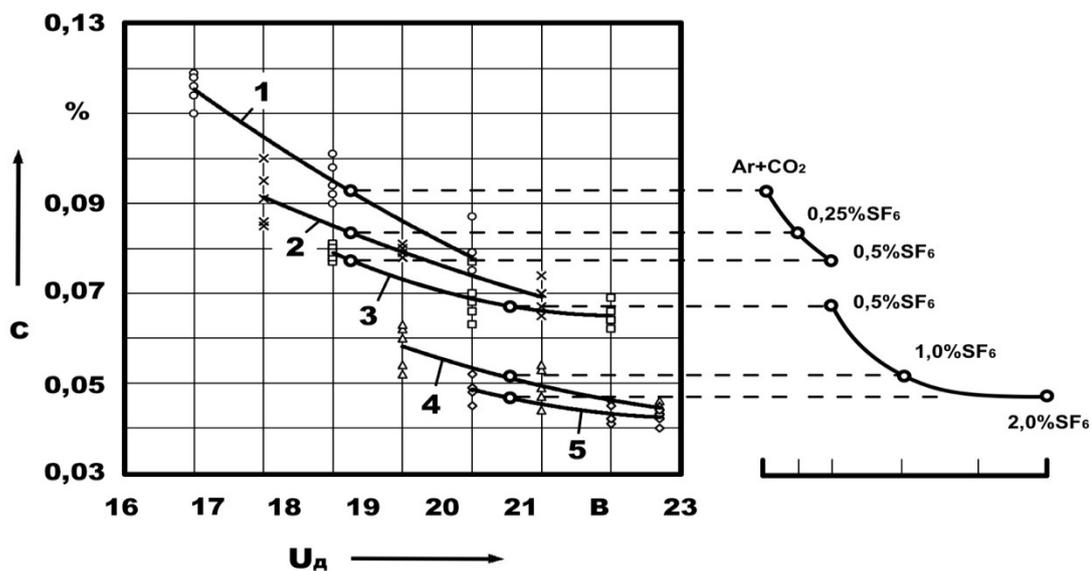


Рис. 5. Зависимость содержания углерода (C) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: а - $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б - $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 4 - (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 5 - (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

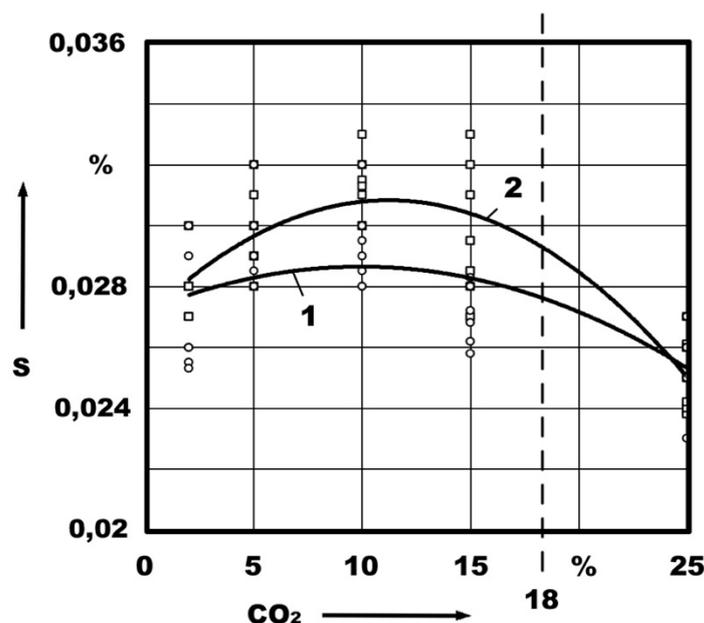


Рис. 6. Зависимость содержания серы (S) в наплавленном металле от количества углекислого газа в защитной газовой смеси (содержание $SF_6 = 0,5\%$, остальное аргон): 1 – $V_{н.пр.} = 3,7$ м/мин; 2 – $V_{н.пр.} = 5,3$ м/мин

Таким образом, изменение окислительного потенциала защитной газовой среды посредством управления соотношением Ar и CO_2 на первом этапе ее образования (до введения SF_6) также может выступать одним из эффективных механизмов снижения количества серы в наплавленном металле. Однако механизм такого воздействия сложен и является предметом отдельного исследования вне рассматриваемой работы.

Поведение кремния и марганца в целом соответствует предполагаемому (рис. 7), что объясняется их активностью по отношению к кислороду, как элементов раскислителей.

При этом эффект от этого взаимодействия более явный, чем от снижения длины дуги, что приводит к снижению концентрации элементов во всем диапазоне значений изменения параметров при проведении эксперимента.

Выводы

Введение гексафторида серы SF_6 в состав защитной газовой атмосферы

оказывает существенное влияние на характер перехода легирующих элементов через дуговой промежуток.

1. Введения SF_6 в защитную газую среду при сохранении значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге приводит к уменьшению длины дуги и ее мощности и, как следствие, к снижению времени контактирования расплавленного металла с омывающим его потоком защитной газовой смеси, что по естественным причинам снижает высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке. Это вызывает повышение количества раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn. Менее интенсивный рост Mn обусловлен частичным связыванием его с серой с образованием сульфидов MnS , что является положительным, но недостаточным эффектом для блокировки растворимости серы в наплавленном металле в рассматриваемом диапазоне значений параметров режима и концентраций компонентов

защитной газовой смеси.

2. Количество серы в наплавленном металле с повышением концентрации SF_6 увеличивается, причем наиболее существенное влияние на процесс оказывает напряжение на дуге. Эффективным способом сдерживания перехода серы в наплавленный металл является

сварка и наплавка на пониженных, более чем на 2...3 В, значениях напряжения. Также одним из механизмов предотвращения чрезмерного перехода серы в наплавленный металл является изменение окислительного потенциала защитной атмосферы.

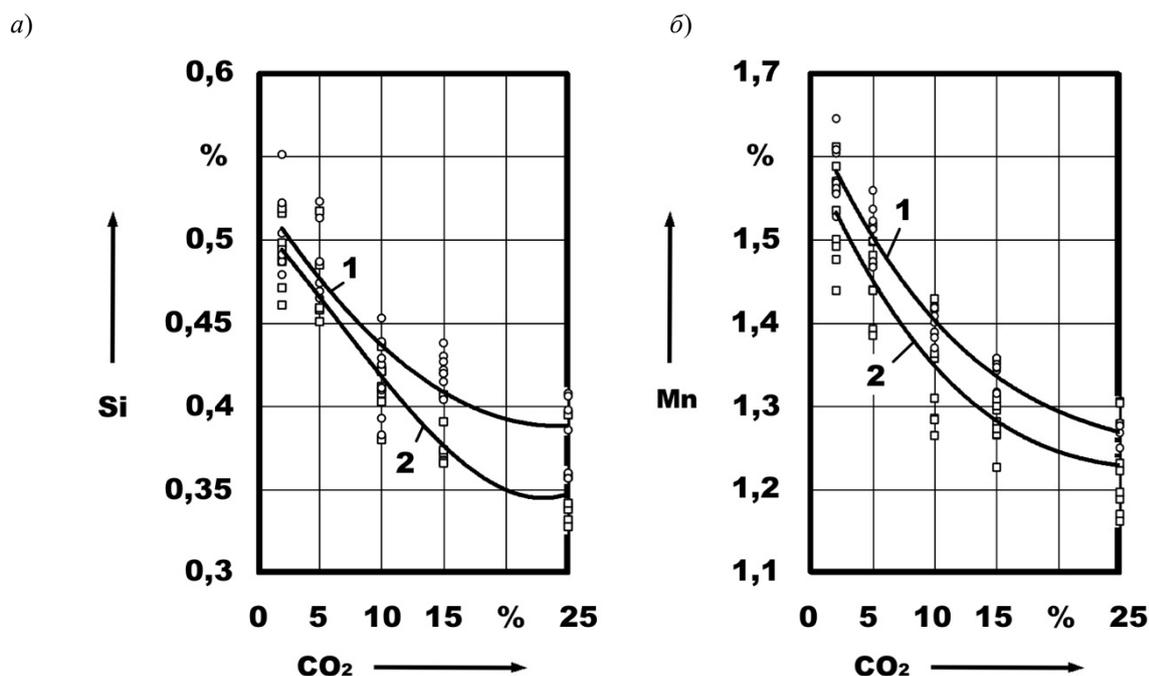


Рис. 7. Зависимость содержания кремния (Si) (а) и марганца (Mn) (б) в наплавленном металле от количества углекислого газа в защитной газовой смеси (содержание $SF_6 = 0,5\%$, остальное аргон): 1 – $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; 2 – $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$) / А. О. Коротеев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–35.
2. Коротеев, А. О. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галогидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 112–118.
3. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

Контакты:

karatseyeu_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);
fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна).

A. O. KARATSEYEU, E. A. FIATSIŠAVA

FEATURES OF TRANSFER OF ALLOYING ELEMENTS THROUGH THE ARC GAP UNDER CONDITIONS OF MODIFICATION OF Ar + CO₂ PROTECTIVE GAS ENVIRONMENT WITH SF₆ HALOGENIDE

Abstract

Based on experimental studies, patterns of changes in the concentration of alloying elements of the filler wire in the deposited metal have been established, which are caused by modification of the protective gas environment (Ar + CO₂) with SF₆ halogenide. The key factors influencing the transition of elements through the arc gap have been identified, and approaches to explaining metallurgical processes occurring in the high-temperature region of the arc gap have been proposed. High-strength low-alloy wire intended for welding steels of bainitic structure with thermomechanical hardening has been studied.

Keywords:

transfer of alloying elements, arc surfacing, welding, modification of protective gas environment, sulfur hexafluoride.

For citation:

Karatseyeu, A. O. Features of transfer of alloying elements through the arc gap under conditions of modification of Ar + CO₂ protective gas environment with SF₆ halogenide / A. O. Karatseyeu, E. A. Fiatsisava // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 14–25.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-26-33

УДК 621.9.044

М. П. КУЛЬГЕЙКО¹, канд. техн. наук, доц.

Н. М. СИМАНОВИЧ²

Г. С. КУЛЬГЕЙКО²

¹Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Беларусь)

²Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (Гомель, Беларусь)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДИАПАЗОНЫ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

Выполнен анализ параметрических диапазонов реализации магнитно-электрических процессов на базе технологического модуля совмещенной обработки. Представлены возможные области осуществления чистовой магнитно-абразивной обработки и магнитно-электрического упрочнения в границах силы разрядного тока и зоны его распространения относительно рабочей площади полусного наконечника. Показаны интервалы устойчивого функционирования технологической системы и промежуточные участки переходных процессов.

Ключевые слова:

совмещенные технологии, технологический модуль, магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое упрочнение.

Для цитирования:

Кульгейко, М. П. Параметрические диапазоны работы технологического модуля совмещенной магнитно-электрической обработки / М. П. Кульгейко, Н. М. Симанович, Г. С. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 26–33.

Введение

Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение надежности и долговечности деталей машин, которые в существенной степени определяются состоянием поверхностного слоя. От качества обработки деталей и состояния их поверхности зависит работоспособность деталей и в целом машин и механизмов. Поверхность и поверхностный слой детали направлены формируются на финишных операциях технологического процесса и качество их во многом определяется уровнем развития технологии машиностроительного производства.

Одним из основных направлений развития машиностроительных технологий в настоящее время является реализация принципа совмещенности [1].

Совмещенность технологий предполагает объединенное выполнение функций объектами во времени и в пространстве при сокращении их общего количества и достижение результата сверх их суммарного за счет эффекта совместного действия, т. е. синергетического эффекта. Это возможно в условиях предметной и функциональной взаимосвязанности технологий, к которым относятся, в частности, магнитно-электрические процессы обработки [2]. Так, например, наиболее значимые направления технологии магнитно-электрической обработки – магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) и магнитно-абразивная обработка (МАО) – объединяет такое важное свойство, как инверсионность процессов, т. е. их обратимость при соответствующем задании параметров реализации.

Совмещенность способов магнитно-электрической обработки (МЭО) основывается на общности энергетических факторов процессов, их технического оснащения и технологического обеспечения практической реализации. Важным фактором является не только непрерывность и взаимосвязанность технологий, но и свойство инверсионности процессов обработки [2]. Преимущества совмещенной магнитно-электрической обработки с максимальной эффективностью можно обеспечить при реализации процессов в одном технологическом комплексе.

Описание работы технологического модуля

Технологический модуль [3] для совмещенной магнитно-электрической обработки (рис. 1) позволяет реализовать в одном устройстве (совмещение в

пространстве) процессы МАО и МЭУ. При этом оба процесса могут осуществляться одновременно (совмещение во времени) с достижением синергетического эффекта. В работе модуля осуществляется первое и четвертое (по классификации [2]) технологические направления генерации поверхности, т. е. образование поверхности путем удаления материала с формированием заданной микрогеометрии и создание поверхностного слоя за счет нанесения дополнительного материала на поверхность детали.

В соответствии с векторной интерпретацией магнитно-электрических способов обработки [4] схема реализации процесса с применением данного модуля относится к первому классу [5], о чем свидетельствует взаимное направление факторов F_i энергетического воздействия $\vec{B} \perp \vec{I} \perp \vec{V}$.

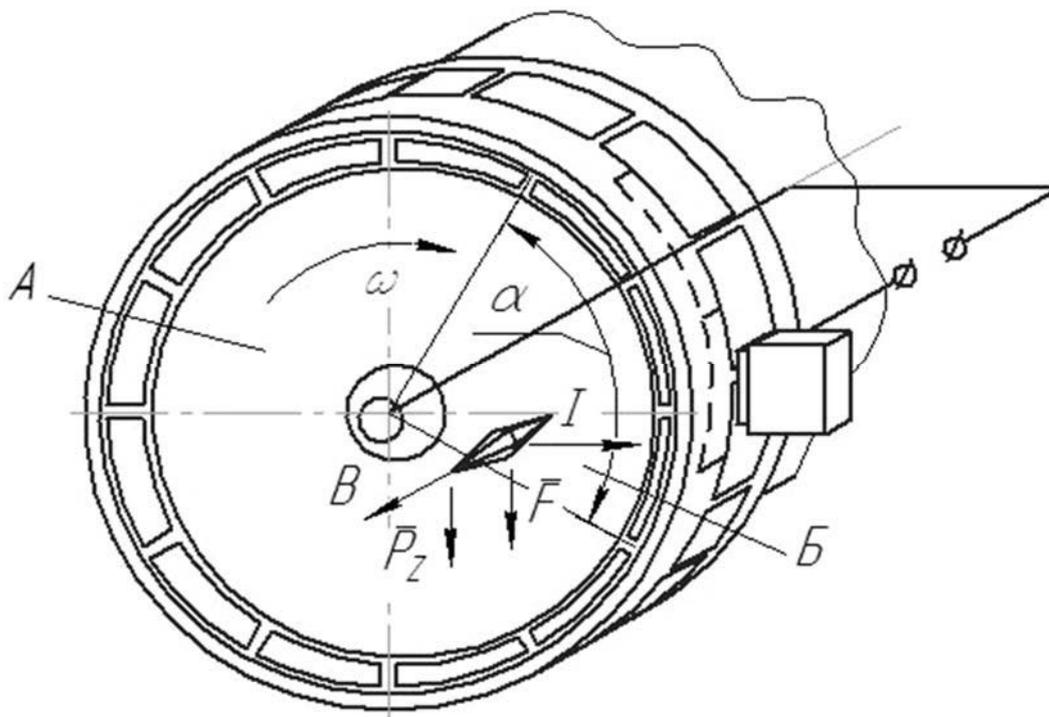


Рис. 1. Векторная схема работы технологического модуля совмещенной магнитно-электрической обработки

При таком взаимодействии энергетических факторов увеличивается механическое воздействие порошка на обрабатываемую поверхность. Следовательно, в режиме чистой магнитно-абразивной обработки (МАО) увеличивается интенсивность процесса микрорезания, что способствует повышению производительности процесса.

Однако в режиме магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) по данным, приведенным в [5], установки первого класса, наряду с третьим и четвертым классами (схемы 3 и 4 [2]), характеризуются более низкой производительностью и качеством формируемого покрытия. Происходит это из-за выброса части расплава порошка из рабочей зоны пондеромоторными силами, возникающими в результате взаимодействия магнитного поля и электрического тока, векторы которых взаимно перпендикулярны. Устранение этого явления может быть достигнуто за счет создания закрытой рабочей зоны, что усложняет конструкцию установки. Поэтому установки этих классов, как правило, применяются для обработки только определенных поверхностей деталей. В частности, они не нашли практического применения при обработке плоских поверхностей. Примером реализации схемы первого класса может быть устройство [6], предназначенное для обработки тел вращения.

Векторная схема действующих в зоне обработки энергетических факторов процесса иллюстрирует возможность совмещения режимов МАО и МЭУ в работе технологического модуля (см. рис. 1). Электрический ток подается через ферромагнитный порошок в объеме, охваченном сектором Б с углом α . Изменение площади сектора Б приводит к изменению плотности электрического тока. А величина сектора пропускания тока, т. е. его площадь, определяется количеством замкнутых в электрическую цепь пластин коллектора, т. е. $\alpha = 2\pi t/n$, где t – количество

замкнутых пластин коллектора; n – общее количество пластин коллектора. За счет изменения количества замыкаемых в электрическую цепь пластин коллектора можно изменять угол α сектора пропускания тока, выбирая его величину от 0 до 2π в зависимости от технологических задач процесса формирования поверхностного слоя. Тогда при $\alpha = 0$, т. е. при отсутствии электрического тока, происходит процесс магнитно-абразивной обработки и реализуется первое технологическое направление генерации поверхности, а при пропускании тока соответствующей величины через весь объем порошка ($\alpha = 2\pi$) осуществляется процесс магнитно-электрического упрочнения, т. е. четвертое технологическое направление формирования поверхностного слоя. В промежуточных вариантах реализуется комбинированная обработка, совмещающая в определенном соотношении оба процесса.

Ферромагнитный порошок, вращающийся совместно с полюсным наконечником и осуществляющий процесс обработки, периодически проходит зону А без тока (сектор в $2\pi - \alpha$ радиан) и зону Б пропускания тока (сектор в α радиан). В зоне А порошок осуществляет процесс абразивного микрорезания и пластического деформирования, интенсивность которого определяется силами резания и, в первую очередь, тангенциальной составляющей силы резания P_z , величина которой, в свою очередь, определяется силами магнитного поля. При дальнейшем вращении сердечника порошок попадает в зону пропускания тока (сектор Б) и, по сути, представляет собой проводник с током в магнитном поле, на который действует возникающая магнитная сила F . Вектор действующей на порошок магнитной силы коллинеарен вектору составляющей силы резания P_z , действующей на обрабатываемую поверхность со стороны порошка. В зависимости от направления вращения сердечника задается направление электрического тока таким

образом, чтобы направление силы F совпадало с направлением силы резания P_z , тем самым увеличивая суммарное силовое воздействие порошка на обрабатываемую поверхность детали. Увеличение силы тока также приводит к разогреву и оплавлению вершин микровыступов обрабатываемой поверхности и кромок ферромагнитного порошка, что способствует интенсификации процессов микрорезания, пластического деформирования и диффузии химических элементов в материал поверхностного слоя детали [3]. Дальнейшее увеличение силы тока приводит к расплавлению зерен ферромагнитного порошка и оплавлению поверхности детали. Образовавшиеся капли расплава под действием электрического и магнитного полей наносятся на обрабатываемую поверхность. В результате происходит выход на режим электромагнитной наплавки, т. е. реализуется технология магнитно-электрического упрочнения.

Так как в зоне с пропуском тока происходит преимущественно упрочняющая обработка, а в зоне без тока – чистовая обработка, то в зависимости от направления движения подачи возможны два варианта реализации процесса обработки. Если обрабатываемая поверхность проходит вначале зону с током (сектор Б), а затем зону без тока (сектор А), то в секторе Б происходит упрочнение поверхности путем наплавки, а в секторе А – зачистка этой поверхности. При обратном направлении подачи вначале осуществляется чистовая обработка поверхности, а затем ее упрочнение. При этом процесс наплавки идет по обработанной поверхности, очищенной от окислов, что способствует ускорению процессов диффузии и улучшению адгезии покрытия с основным металлом.

Таким образом, за счет изменения площади сектора Б пропуска электрического тока и регулируя силу тока можно изменять интенсивность энергетического

воздействия на обрабатываемую поверхность. Это позволяет управлять процессом обработки и реализовать различные режимы в диапазоне от МАО и МЭУ с переходным процессом легирования поверхностного слоя. Подробное описание процессов представлено в [3]. С практической точки зрения наибольший интерес представляет комбинированный режим процесса, включающий чистовую обработку и упрочнение. Соотношение этих процессов при заданной силе тока определяется углом α сектора пропуска тока.

Цель работы – установление оптимального соотношения силы тока и зоны его действия для различных способов совмещенной магнитно-электрической обработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективность МЭО определяется интенсивностью воздействия энергетических факторов на элементы технологической системы – частицы ферромагнитного порошка и обрабатываемую (формируемую) поверхность детали. В зависимости от режима обработки (МАО или МЭУ) влияние факторов энергетического воздействия существенно различное. Так, при МАО основная роль принадлежит силовым и скоростным параметрам процесса, т. е. факторам, определяющим силу давления частиц порошка на обрабатываемую поверхность детали и скорость их относительного перемещения (факторы V и I) [7–10]. Пропускание рабочего тока силой до 10...15 А способствует интенсификации процесса обработки и улучшению физико-механических свойств сформированной поверхности [9, 11, 12].

На процесс формообразования поверхности при МЭУ по степени значимости в порядке убывания оказывают влияние такие виды энергии, как электрическая, магнитная и механическая,

т. е. основная роль принадлежит разрядному току. Плотность разрядного тока i оказывает решающее влияние на производительность формирования покрытия [13] и существенное – на его сплошность. Разрядный ток I оказывает наибольшее влияние на износостойкость и твердость покрытия, а также на объемную пористость [14]. При увеличении i производительность возрастает за счет интенсивности нагрева и расплавления порошка при преобразовании электрической энергии в тепловую. Однако при достижении определенного значения i_m производительность процесса снижается из-за вероятности возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника [14].

Таким образом, эффективность работы модуля совмещенной обработки определяется энергетическим режимом процесса и одним из основных факторов интенсивности явлений, происходящих в рабочей зоне, является разрядный ток. А область распространения энергетического воздействия зависит от угла α сектора пропускания электрического тока. Следовательно, интенсивность процессов, протекающих в рабочей зоне, их результативность и производительность обработки в значительной степени определяется энергонасыщенностью физических явлений и областью их распространения на обрабатываемой поверхности детали.

Плотность тока, соответствующая определенному режиму реализации метода обработки, определяется выражением

$$i = I/S_k, \quad (1)$$

где I – сила разрядного тока; S_k – площадь контакта зерен порошка в границах сектора пропускания тока на расстоянии R_i от центра сердечника.

Радиусное расстояние R_i для предварительного анализа целесообразно принять из условия равенства площадей по обе стороны от дугового сечения

сектора, т. е. площади центральной и периферийной областей сектора торцовой поверхности полюсного наконечника.

Площадь центральной области сектора Б полюсного наконечника

$$S_1 = 0,5\alpha \cdot (R_i^2 - r^2), \quad (2)$$

где α – угол сектора пропускания тока; r – радиус электропроводного наконечника.

Площадь периферийной области сектора Б полюсного наконечника

$$S_2 = 0,5\alpha \cdot (R^2 - R_i^2), \quad (3)$$

где R – наружный радиус торцовой поверхности полюсного наконечника.

Приравняв обе части уравнений (2) и (3), найдем радиусное расстояние R_i до поверхности сечения равных площадей

$$R_i = \sqrt{(R^2 + r^2)/2}. \quad (4)$$

Тогда дуговое сечение массы порошка, через которое проходит разрядный ток, будет иметь площадь

$$S_k = \sqrt{(R^2 + r^2)/2} \cdot \alpha \cdot \delta \cdot k, \quad (5)$$

где δ – толщина массы порошка, равная величине рабочего зазора; k – коэффициент, учитывающий плотность расположения зерен в массе порошка.

Из формул (1) и (3) можно найти выражение для угла α сектора Б пропускания тока

$$\alpha = \frac{I}{i \cdot \delta \cdot k \cdot \sqrt{(R^2 + r^2)/2}}. \quad (6)$$

Так как для каждого режима магнитно-электрической обработки плотность тока имеет определенное заданное значение, в качестве постоянной величины K для конкретного способа

реализации процесса МЭО можно обозначить

$$K = \frac{1}{i \cdot \delta \cdot k \cdot \sqrt{(R^2 + r^2)/2}}. \quad (7)$$

В результате выражение (6) представим в виде

$$\alpha = K \cdot I. \quad (8)$$

Исходя из соотношения (8), взаимосвязь силы разрядного тока и зоны его воздействия для различных процессов МЭО можно представить в виде графической зависимости, изображенной на рис. 2. Здесь в качестве параметра, характеризующего площадь, охватываемую действием электрического тока, является угол α сектора торцевой поверхности полюсного наконечника.

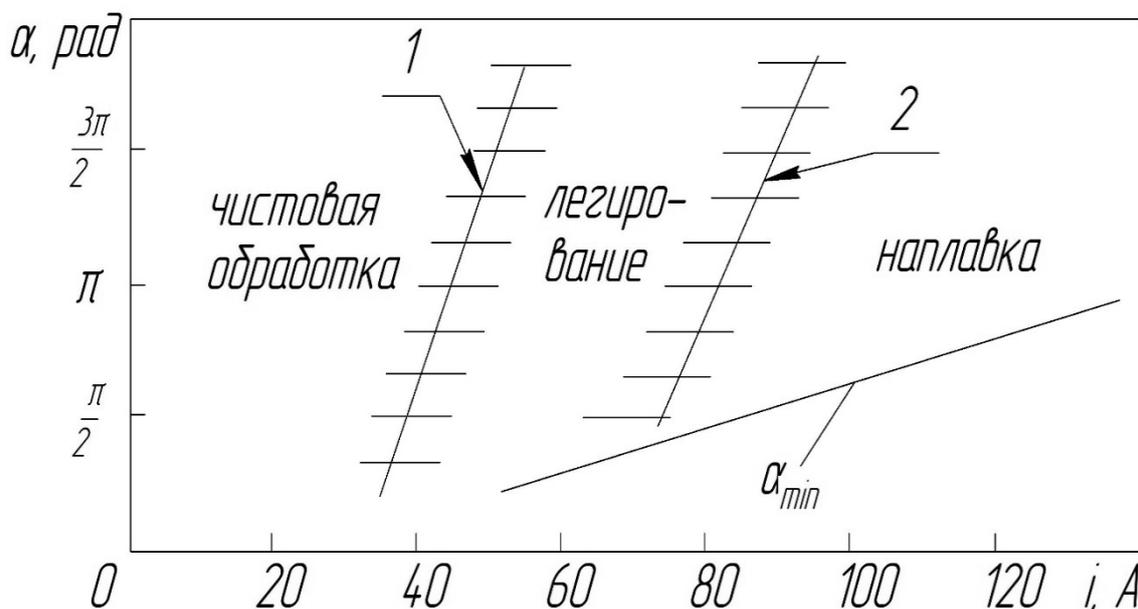


Рис. 2. Режимы процессов магнитно-электрической обработки

При работе модуля совмещенной МЭО количественное значение силы разрядного тока (или его плотности) зависит от большого числа факторов и устанавливается на основе экспериментальных данных при отладке режимов функционирования технологической системы. Истинную силу тока определить с достаточной степенью точности затруднительно [14]. Плотность тока как параметр процесса обработки применяется при сравнительной оценке факторов и режимов процесса МЭУ. Производительность процесса упрочнения зависит от параметров электрических импульсов (амплитуды, частоты, формы

и т. п.), что определяется характеристикой применяемого источника разрядного тока. Наибольшее применение в производстве находят сварочные выпрямители типа ВД, которые позволяют регулировать силу разрядного тока в широком диапазоне.

Плавление цепочек порошка под действием выделяемой теплоты от разрядного тока в рабочей зоне происходит дискретно за счет кратковременных электрических разрядов. Частота возникновения импульсов зависит от силы разрядного тока, напряжения и других факторов, и одновременно в рабочей зоне происходит один или несколько

дуговых разрядов. При постоянном токе процесс упрочнения осуществляется в импульсном режиме с различной длительностью и частотой импульсов. При этом сила разрядного тока должна быть достаточна для возбуждения дугового разряда. Положение области наплавки на диаграмме (см. рис. 2) отражает соответствие значения минимальной силы разрядного тока при устойчивом процессе упрочнения, которое составляет порядка 80 А при минимальном значении угла α_{\min} . При увеличении разрядного тока процесс может распространяться на большую площадь обрабатываемой поверхности. Однако из-за взаимного подавления дуговых разрядов на соседних цепочках порошка и разномоментного их возникновения не происходит ожидаемого нарастающего распространения процесса наплавки на всю охватываемую поверхность детали.

Заключение

Выполненный анализ позволяет установить взаимосвязь силы разрядного тока и области его эффективного воздействия в рабочей зоне технологического модуля для основных способов магнитно-электрической обработки. Представленная диаграмма отражает области устойчивого осуществления процессов чистой обработки и упрочнения поверхности, а также границы нестабильного протекания физико-механических и электрофизических явлений в зоне обработки. Точные значения параметров практической реализации процессов обработки определяются экспериментально на основе опытных данных при отладке технологической системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении / А. Д. Никифоров [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2007. – 327 с.
2. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.
3. Кульгейко, М. П. К вопросу о возможности реализации совмещенной технологии магнитно-электрических способов обработки / М. П. Кульгейко, Н. М. Симанович, Г. С. Кульгейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 31–38.
4. Шулев, Г. С. Перспективы использования магнитных и электрических полей в машиностроении и металлообработке / Г. С. Шулев // Третий науч.-техн. семинар с междунар. участием по технологии финишной обработки. – Варна, НРБ, 1987. – С. 4–7.
5. Люцко, В. А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Люцко; ПГУ. – Новополоцк, 2004. – 24 с.
6. Устройство для нанесения покрытий из электропроводных порошков: а. с. SU 1352783 / Г. С. Шулев, В. Ф. Буйневич, В. А. Люцко. – Опубл. 17.03.1986.
7. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
8. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 215 с.
9. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 270 с.
10. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
11. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика, М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
12. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
13. Обработка заготовок деталей машин / А. В. Миранович [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочка. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 171 с.

14. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.

Статья сдана в редакцию 29 апреля 2024 года

Контакты:

kulgeyko82@gambler.ru (Кульгейко Михаил Петрович);
nataliasimoniha1991@gmail.com (Симанович Наталья Михайловна);
kulgeyko@gstu.by (Кульгейко Галина Степановна).

M. P. KULGEYKO, N. M. SIMANOVICH, G. S. KULGEYKO

PARAMETRIC OPERATING RANGES OF THE TECHNOLOGICAL MODULE FOR COMBINED MAGNETO-ELECTRIC PROCESSING

Abstract

The paper analyzes parametric ranges of implementing magneto-electric processes based on the technological module for combined processing. Possible areas for finishing magneto-abrasive machining and magneto-electric hardening within the limits of the strength of the discharge current and the zone of its distribution relative to the working area of the pole tip are presented. The intervals of stable functioning of the technological system and the intermediate sections of transient processes are shown.

Keywords:

combined technologies, technological module, magneto-abrasive machining, magneto-electric hardening.

For citation:

Kulgeyko, M. P. Parametric operating ranges of the technological module for combined magneto-electric processing / M. P. Kulgeyko, N. M. Simanovich, G. S. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 26–33.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-34-41

УДК 691.175, 620.172

И. А. ЛЕОНОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Д. Д. АДИНЦОВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ABS-ПЛАСТИКА И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению механических характеристик ABS-пластика при его статическом растяжении. При изготовлении образцов методом FFF-печати варьировалось процентное заполнение объема при постоянном стиле заполнения «linear». Адекватность полученных результатов проверялась на конечно-элементной модели в программном комплексе Solid Works Simulation.

Ключевые слова:

FFF-печать, ABS-пластик, аддитивные технологии, испытание на растяжение, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Для цитирования:

Леонович, И. А. Результаты экспериментального определения механических свойств ABS-пластика и их теоретическое подтверждение на компьютерной модели / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 34–41.

Введение

ABS-пластик относится к ударопрочным пластмассам с довольно высокими прочностными свойствами, который широко используется в получении изделий по FFF-технологии.

Изучением механических свойств ABS-пластика исследователи занимаются с 1996 г., выполняя печать и испытания на разном оборудовании, опираясь на стандарты разных стран. В [1–8] исследовались свойства ABS-пластика определенных марок или с добавками [2, 8], причем отмечается большое разнообразие в выборе формы и размеров образцов по разным стандартам. В тех или иных работах фиксировалось положение образцов при печати, стиль и плотность заполнения, количество контурных слоев и т. д. Соответственно и результаты испытаний варьируются в довольно широких пределах.

Например, в [7, 8] определялись свойства ABS-пластика без добавок,

в соответствии с требованиями одного и того же стандарта [9]. Результаты получились разные: в [7] прочностные и упругие свойства на растяжение вполне соизмеримы со свойствами литого материала, в [8] эти же свойства в 2–2,5 раза ниже.

Собственные исследования, проведенные ранее при 100-процентном заполнении объема стилем «linear» [12–14], по показателям прочности были близки к литому материалу [15] и к результатам многих авторов [1–7]. Предел прочности на растяжение в наших исследованиях составил $\sigma_{рм} = 37,78$ МПа [12].

Модуль продольной упругости на растяжение оказался существенно меньше данных других авторов [1, 2, 4, 7]. В приведенных литературных источниках при разном процентном заполнении объема, разном расположении нитей в слоях по отношению к растягивающей силе и разном используемом оборудовании модуль продольной упругости определялся в пределах 1282...2272 МПа.

В наших исследованиях среднее значение модуля продольной упругости составило $E_p = 627,36$ МПа [12], что в 2–3 раза меньше показателя литого материала.

Результаты, аналогичные нашим, были получены в [8], где модуль продольной упругости ABS-пластика определялся в пределах 586...737 МПа при испытании образцов со 100-процентным заполнением. Однако предел прочности на растяжение в этой работе был в пределах 9,36...10,8 МПа, что в 3 и более раза меньше наших показателей (более крупные размеры образца не могли в такой степени повлиять на результат).

Цель работы – сопоставить прочность на растяжение реального образца из ABS-пластика, полученного методом

FFF-печати (Fused Filament Fabrication), и аналогичной цифровой модели, расчет в которой производится с использованием экспериментально полученных характеристик упругости материала.

Сравнение результатов натуральных испытаний с виртуальным расчетом позволит проверить как адекватность модели образца, так и адекватность экспериментальных механических характеристик.

Изготовление образцов и их испытание на растяжение

Исследования проводились на образцах по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012), тип 1В с разной степенью заполнения (рис. 1).



Рис. 1. Плоские образцы по ГОСТ 11262–2017, тип 1В

Для изготовления образцов по FFF-технологии использовался 3D-принтер VSHAPER PRO с диаметром сопла экструдера 0,4 мм и точностью подачи проволоки 1 мкм [12].

Печать образцов производилась из проволоки ABS Eco (black) от белорусской компании Alfa-Filament с расположением образцов плоской стороной на подложке. По периметру образцов печатался контурный слой, состоящий из трех филаментов.

Для всех образцов постоянными поддерживались следующие параметры печати:

- скорость печати, мм/с – 45...50;
- температура головки экструдера, °С – 235;
- температура нагрева камеры, °С – 60;

– температура нагрева стола, °С – 90.

Образцы формировались стилем «linear» (рис. 2) с разной степенью заполнения.

Испытание на статическое растяжение осуществлялось в соответствии с ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 34370–2017 на универсальной машине Kason WDW-5 при скорости нагружения 1 мм/мин. При испытании автоматически определялись: предел прочности материала при растяжении σ_{pm} , относительное удлинение при разрыве ε_{pp} .

Модуль продольной упругости при растяжении E_p рассчитывался вручную в соответствии с [10, 11].

Результаты испытаний и расчетов для образцов серий «Л» показан в табл. 1.

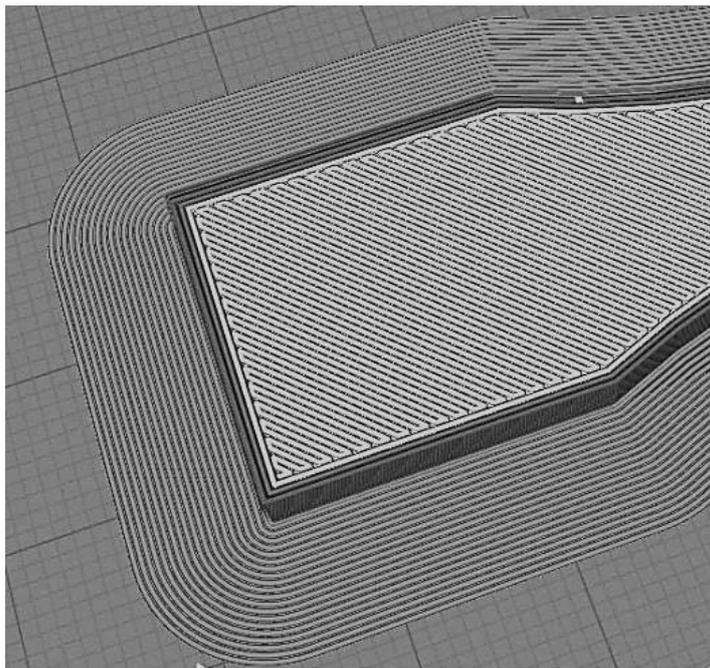


Рис. 2. Стиль заполнения образцов «linear»

Табл. 1. Результаты испытания образцов серии «Л»

Серия образцов	Заполнение, %	Предел прочности при растяжении $\sigma_{рл}$, МПа	Модуль упругости при растяжении E_p , МПа	Относительное удлинение при разрыве $\varepsilon_{рр}$, %
Л1–Л5	100	36,1	739	7,48
Л6–Л10	90	32,68	734,3	8,08
Л11–Л15	80	30,6	714,3	7,38

Испытания подтвердили, что аддитивный ABS-пластик с плотностью заполнения 80 %...100 % обладает высокими прочностными свойствами, соизмеримыми с показателями для литого материала, которые находятся довольно в больших пределах (прочность при растяжении 26...47 МПа при плотности 1,02...1,06 г/см³ [16]). При этом плотность аддитивного материала ниже.

Модуль продольной упругости на растяжение оказался на 14 %...15 % выше, чем ранее определенное значение на малых образцах (тип 1 [10]) в [12].

Особенности формирования этих образцов и последующее исследование структуры материала в разломах показали, что не все слои материала деформировались одинаково при растяжении. Этого недостатка лишены образцы типа 1В в указанном на рис. 2 стиле заполнения.

Существенным результатом исследований является то, что полученные значения модуля упругости в 2–3 раза ниже результатов других авторов, за исключением работы [8].

Статический расчет модели образца

Для проверки адекватности полученных экспериментальных данных была построена виртуальная модель образца и рассчитана на статическое растяжение. За основу модели взят образец типа 1В [10] с изотропными свойствами, приведенными в табл. 1 ($\sigma_{рм}$ и $E_{рр}$). Коэффициент Пуассона в расчетах принят равным 0,36, как в [1].

Конечно-элементная модель образ-

ца разработана в программном комплексе SolidWorks. Параметры сетки конечных элементов показаны в табл. 2.

Статический расчет выполнялся в приложении Simulation, причем средняя максимальная нагрузка для каждой серии образцов уменьшалась пропорционально средней реальной площади поперечного сечения по сравнению с теоретической площадью в 40 мм². В табл. 3 показаны усредненные опытные и откорректированные данные для статического расчета.

Табл. 2. Параметры сетки конечных элементов для статического расчета

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки	Выкл.
Включить автоциклы сетки	Выкл.
Точки Якобиана для сетки высокого качества	16 точек
Размер элемента	1,3627 мм
Допуск	0,0681348 мм
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	20377
Всего элементов	11774
Максимальное соотношение сторон	3,9679
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99,7

Табл. 3. Исходные данные для статического расчета

Серия образцов	Средняя максимальная сила в серии $F_{рм}$, Н	Средняя площадь поперечного сечения серии A_0 , мм ²	Модуль упругости при растяжении E_p , МПа	Теоретическая максимальная сила $F_{рм}$, Н
Л1–Л5	1563,68	43,3	739	1444,5
Л6–Л10	1375,88	42,13	734,3	1306,3
Л11–Л15	1285,46	42,02	714,3	1223,7

На рис. 3 показаны эпюры нормальных напряжений в моделях, со-

свойствами пластика, определенными экспериментально.

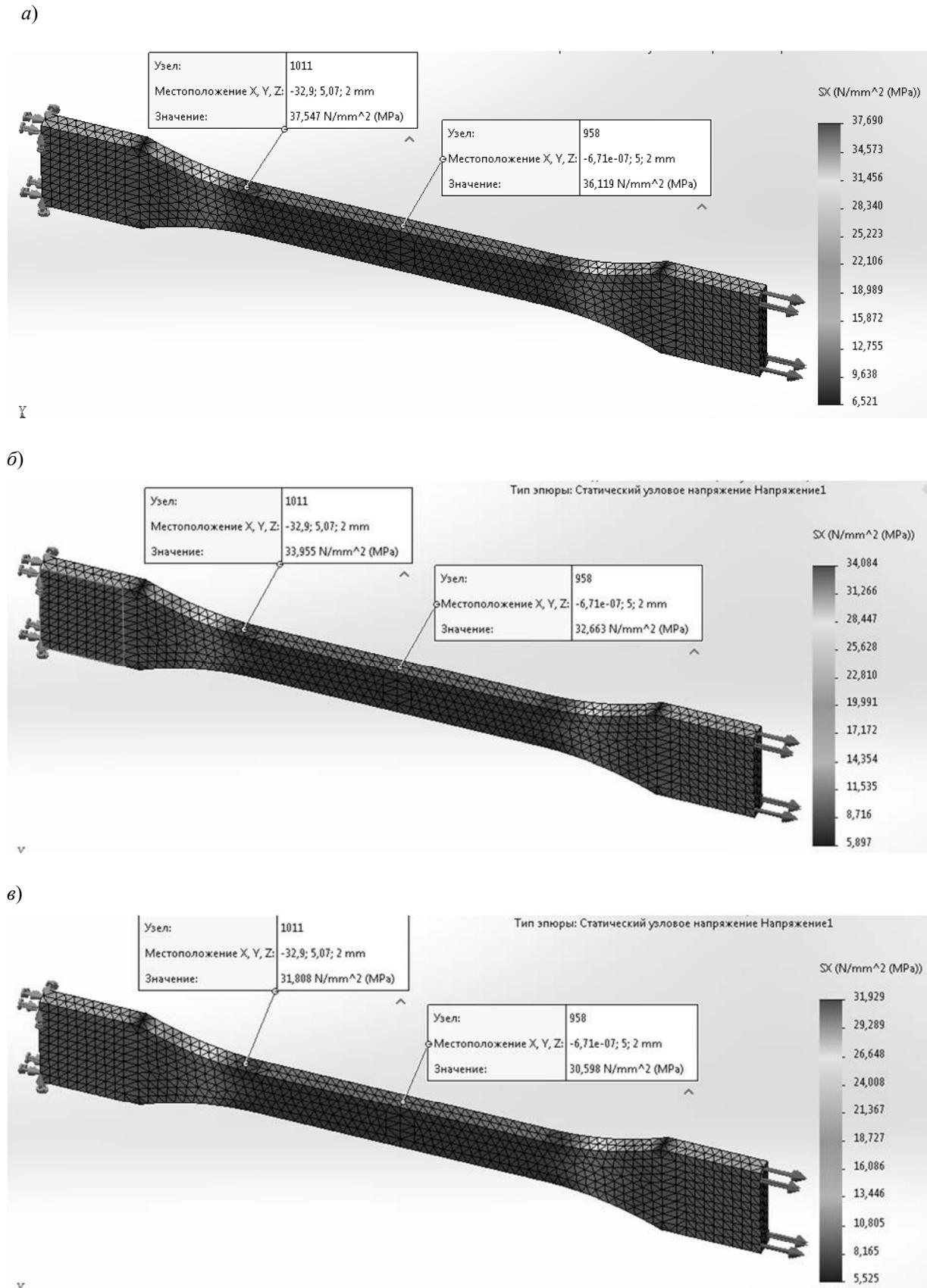


Рис. 3. Эпюры напряжений для ABS-пластика со свойствами: а – образцов серии Л1–Л5; б – образцов серии Л6–Л10; в – образцов серии Л11–Л15

На эпюрах указаны значения напряжений посередине образца и максимальные напряжения по месту перехода от прямого участка к радиусу закругления.

В качестве расчетного предела прочности на растяжение будем принимать напряжение в средней части

модели, т. к. подавляющее большинство образцов разрушалось в пределах контрольной длины.

В табл. 4 показаны результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных по виртуальной модели.

Табл. 4. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных

Серия образцов	Предел прочности при растяжении $\sigma_{рм}$, МПа	Напряжение посередине длины модели σ , МПа	Расхождение теоретических и опытных данных, %
Л1–Л5	36,1	36,119	0,05
Л6–Л10	32,68	32,663	0,05
Л11–Л15	30,6	30,598	0,03

Расхождение между теоретическим напряжением и экспериментальным пределом прочности практически отсутствует. Следовательно, модуль продольной упругости для ABS-пластика, полученного наплавлением нитей, действительно находится в заявленных нами пределах.

Виртуальная модель показала, что стандартный образец в месте перехода от прямого участка к радиусу закругления обладает максимальным напряжением, приблизительно на 4 % превышающем номинальные напряжения в средней части образца. Это объясняет тот факт, что некоторые образцы разрушились за пределами контрольной длины. Учитывая незначительное расхождение центрального и максимального напряжений, можно утверждать, что значение предела прочности при растяжении также подтверждается и за пределами контрольной длины.

Заключение

Представлены результаты экспериментального определения механических характеристик ABS-пластика (ABS Eco),

полученного наплавлением нитей (FFF-печать) при его статическом растяжении: предел прочности при растяжении, модуль продольной упругости, относительное удлинение при разрыве. Пополнена база экспериментальных данных по свойствам ABS-пластика, увязанная со степенью заполнения при печати образцов в стиле «linear». Значение предела прочности на растяжение варьировалось в пределах от 30,6 до 36,1 МПа, модуля продольной упругости – от 714,3 до 739 МПа при изменении степени заполнения от 80 % до 100 %.

Подтверждено, что прочность ABS-пластика, полученного наплавлением нитей, соизмерима с прочностью литого (сплошного) материала, а модуль продольной упругости значительно ниже (в 2–2,8 раза). В большинстве источников литературы [1–7] модуль продольной упругости на растяжение в аддитивном пластике ниже показателя для литого материала максимум на 40 %...50 %, что не подтвердилось нашими исследованиями.

Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждена на конечно-элементной модели образца,

построенной в программном комплексе SolidWorks. Статический расчет, выполненный в приложении Simulation, при откорректированной максимальной силе и экспериментальном модуле

упругости показал получение нормальных напряжений при осевом растяжении модели, практически не отличающихся от экспериментального предела прочности материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шмелев, А. В.** Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати [Электронный ресурс] / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Наука и инновации: электрон. науч.-техн. изд. – 2021. – Вып. 4 (112). – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>. – Дата доступа: 14.04.2022.
2. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) [Электронный ресурс] / С. В. Кондрашов [и др.] // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2019. – № 10 (82). – С. 34–49. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru>. – Дата доступа: 05.06.2022.
3. **Бурлов, В. В.** Особенности процесса свободного наслаивания расплавов аморфных термопластов и его влияние на свойства изделий, получаемых по 3D-технологии / В. В. Бурлов, К. Н. Спилов, В. К. Крыжановский // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2016. – № 36 (62). – С. 52–57.
4. Механические свойства ABS-пластика, полученного по FDM-технологии. Современный взгляд на проблемы технических наук / Е. С. Костина [и др.] // Современный взгляд на проблемы технических наук: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 42–46.
5. Свойства изделий из АБС-пластиков и полиамида, получаемых методом 3D-печати / К. С. Беседина [и др.] // Изв. СПбГТИ (ТУ). – 2018. – № 45. – С. 60–63.
6. **Балашов, А. В.** Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью [Электронный ресурс] / А. В. Балашов, М. И. Маркова // Инж. вестн. Дона. – 2019. – № 1. – Режим доступа: ivdon.ru/magazine/archive/nly2019/5618. – Дата доступа: 14.04.2022.
7. Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts Proceedings of the ASME 2014 [Electronic resource] / K. Savvakis [et al.] // International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2014 November 14-20, 2014, Montreal, Quebec, Canada. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/283498079>. – Date of access: 15.09.2023.
8. Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling [Electronic resource] / R. Hernandez [et al.] // Ingram School of Engineering, Texas State University, San Marcos, Texas 78666. – Mode of access: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2016/076>. – Date of access: 15.09.2023.
9. **ASTM D638–14.** Стандартный метод испытаний свойств пластмасс на растяжение // ASTM International. – 2014. – P. 17.
10. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 24 с.
11. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1: Общие принципы: ГОСТ 34370–2017 (ISO 527–1:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 27 с.
12. **Леонович, И. А.** Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 1. – С. 13–21.
13. **Леонович, И. А.** Механические испытания ABS-пластика и структура образцов, полученных наплавлением нитей / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 143.
14. **Адинцов, Д. Д.** Сравнение результатов натуральных и виртуальных испытаний на растяжение образцов из ABS-пластика / Д. Д. Адинцов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: тез. докл. Междунар. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 48.
15. **Барвинский, И. А.** Справочник по литьевым термопластичным материалам [Электронный ресурс] / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская. – Режим доступа: <http://barvinsky.ru/guide/guide-materials.htm>. – Дата доступа: 01.08.2021.

Статья сдана в редакцию 29 апреля 2024 года

Контакты:

loleonia@gmail.com (Леонович Ирина Анатольевна);
adintsov.daniil@mail.ru (Адинцов Даниил Дмитриевич).

I. A. LEANOVICH, D. D. ADZINTSOU

RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ABS-PLASTIC AND THEORETICAL CONFIRMATION OF THEM ON A COMPUTER MODEL

Abstract

The paper presents the results of the experimental studies to determine mechanical characteristics of ABS-plastic under its static tension. In the manufacture of samples by FFF-printing method, the percentage of volume filling varied with a constant «linear» filling pattern. The adequacy of the results obtained was tested on a finite element model in the Solid Works Simulation software package.

Keywords:

FFF-printing, ABS-plastic, additive technologies, tensile testing, computer modeling, finite element method.

For citation:

Leanovich, I. A. Results of experimental determination of mechanical properties of ABS-plastic and theoretical confirmation of them on a computer model / I. A. Leanovich, D. D. Adzintsov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 34–41.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-42-50

УДК 621.9.042

С. Г. ПОЛТОРАЦКИЙ

В. М. ШЕМЕНКОВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ СПЕЦИАЛЬНЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Аннотация

Представлены результаты имитационного моделирования процесса резания различных материалов при формировании профиля гранных отверстий различной гранности специальным осевым инструментом.

Ключевые слова:

траектория, гранное отверстие, сила резания, крутящий момент.

Для цитирования:

Полторацкий, С. Г. Моделирование процесса формирования гранных отверстий специальным осевым инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 42–50.

Введение

Расчет сил резания и построение схемы действия данных сил является важной частью расчета инструмента на точность и прочность. Без этих данных невозможно дать адекватную оценку процессам, протекающим в зоне обработки, и, следовательно, планировать получение качественных поверхностей после обработки.

В зависимости от степени сложности условий, в которых совершается процесс пластического деформирования металлов при резании, и, следовательно, стружкообразование, необходимо принципиально различать два случая – свободное и несвободное резание.

При свободном резании в работе принимает участие только главная режущая кромка и все участки режущей кромки находятся в одинаковых условиях, а направления перемещения всех частиц стружки практически одинаковы [1].

Несвободное резание воспроизводится в наиболее распространенных технологических схемах обработки металлов – точении, строгании, фрезеро-

вании, зубофрезеровании, сверлении и других; характеризуется тем, что слой металла срезается несколькими режущими кромками или одной криволинейной режущей кромкой. Соответственно, зубья инструментов, работающих одновременно тремя режущими кромками, подвергаются более интенсивному износу.

При несвободном резании силу R , которая преодолевает сопротивление резанию, можно разложить на три составляющие [2]: окружную силу P_z , действующую по касательной к траектории движения режущего лезвия; радиальную P_r , действующую по радиусу инструмента; осевую силу P_x , действующую вдоль оси инструмента.

Методика проведения исследований

Специфика формирования гранных отверстий предлагаемым методом с использованием специального режущего инструмента (с выступающим зубом), где в процессе формообразования отверстия участвуют от одного до трех зубьев с различными глубинами резания [3], стандартные схемы резания не при-

менимы. Для расчета составим схему действия этих сил на инструмент для

формирования гранных отверстий [4] (рис. 1).

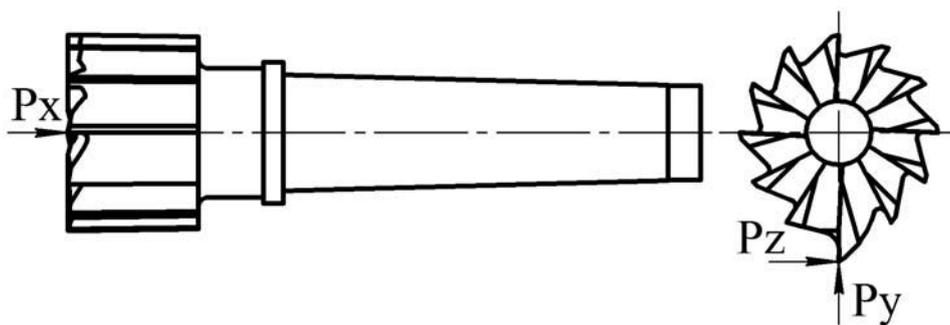


Рис. 1. Схема сил резания, действующих на инструмент при обработке

Рассчитаем силы резания, возникающие при обработке квадратного отверстия с диаметром вписанной окружности 40 мм, пользуясь технической литературой [4, 5].

Гранное отверстие возможно получить осевым инструментом сразу в сплошном материале или же предварительно получить круглое отверстие классическим способом, а далее рассверлить осевым инструментом. С технологической точки зрения предварительно полученное круглое отверстие должно быть меньше диаметра вписанной окружности обрабатываемого гранного отверстия.

При расчете стоит учесть, что при формировании гранного отверстия с предварительно просверленным отверстием силы будут действовать не на все зубья инструмента, а только на два (при обработке квадратного отверстия), которые непосредственно учувствуют в формообразовании (рис. 2). В случае с обработкой отверстий, имеющих больше четырех граней, силы будут действовать только на один зуб.

Если предварительно просверленного отверстия не будет, то в формообразовании будут участвовать все зубья.

Классическая формула расчета глубины резания t при классическом рассверливании при обработке гранных отверстий не подойдет, поэтому на ос-

новании опыта получения гранных отверстий и кинематики процесса резания расчет глубины резания будем осуществлять по эмпирической формуле.

Для первого (выступающего) зуба она будет иметь вид

$$t_1 = (0,159 \cdot (d_{вп} - 1) + 0,658) \cdot k_1, \quad (1)$$

где $d_{вп}$ – диаметр вписанной окружности обрабатываемого гранного отверстия; k_1 – коэффициент, учитывающий количество граней обрабатываемого отверстия (для квадратного отверстия $k_1 = 1$; для пятигранного – $k_1 = 0,51$; для шестигранного – $k_1 = 0,42$; для семигранного – $k_1 = 0,32$; для восьмигранного – $k_1 = 0,28$).

Для второго зуба

$$t_2 = 0,1 \cdot (d_{вп} - 1) + 0,1. \quad (2)$$

Приложим рассчитанные силы (при обработке с предварительно полученным круглым отверстием) к режущим зубьям инструмента на примере обработки квадратных отверстий согласно представленной ранее схеме (см. рис. 1) в программном комплексе Ansys Static Structural (рис. 4), зафиксировав хвостовик инструмента, имитируя тем самым закрепление его в шпинделе станка, и получим следующий результат (рис. 3).

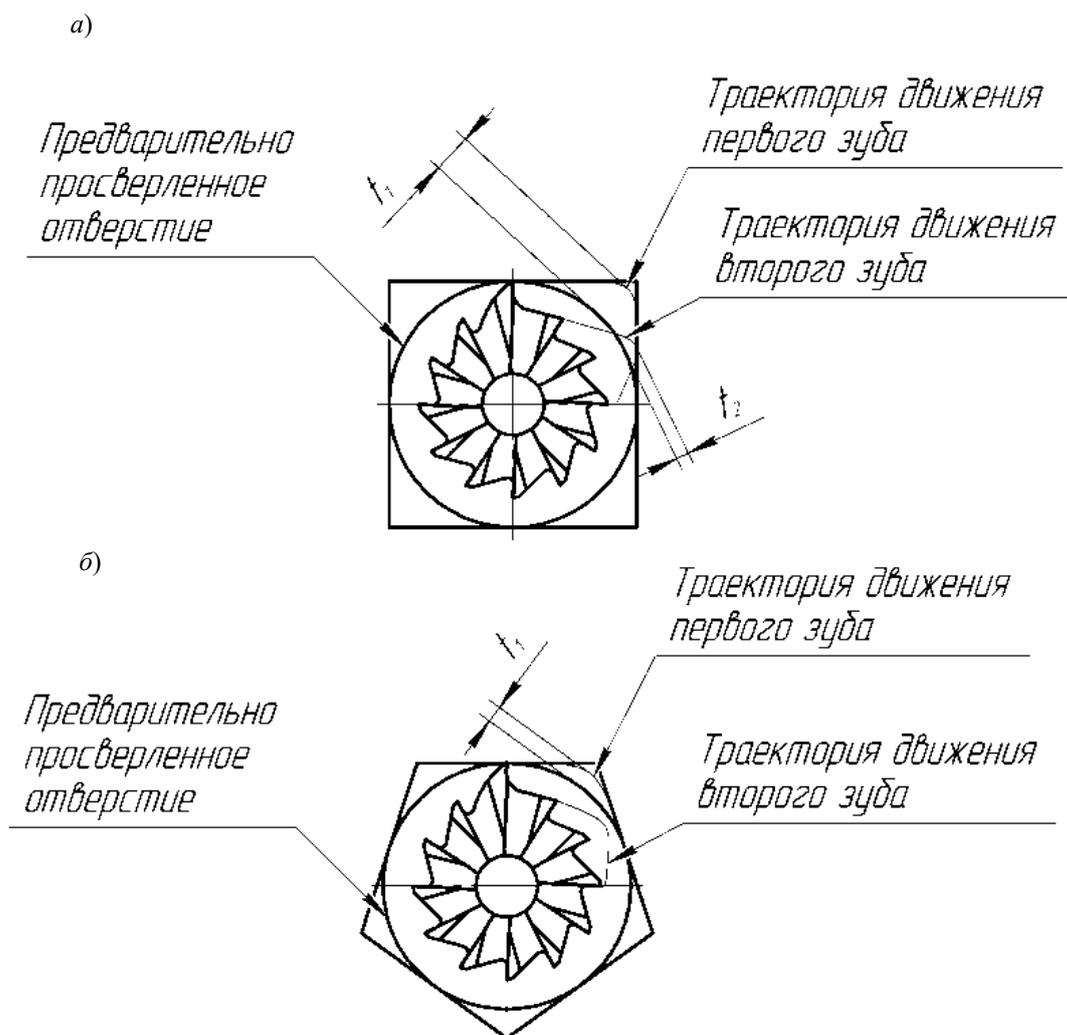


Рис. 2. Траектории движения рабочих зубьев инструмента при обработке квадратного отверстия (а) и пятигранного отверстия (б) с предварительно просверленным отверстием

В качестве хвостовика (присоединительной части) инструмента принимаем конус Морзе с резьбовым отверстием, который широко используется для концевых фрез и позволяет обеспечить надежную работу инструмента как с осевыми, так и с радиальными силами резания.

В качестве материала режущей части принимаем основную быстрорежущую сталь Р6М5 по ГОСТ 19265–73. Учитывая тот факт, что используемый программный продукт основан на стандартах ISO и не имеет в своей библиотеке указанного материала, характеризующегося определенным комплексом

эксплуатационных свойств, задаем необходимые для расчета параметры (предел текучести, модуль упругости, плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность и др.) самостоятельно, опираясь на данные [6].

Для получения полной силовой картины при формировании гранных отверстий в качестве обрабатываемых материалов принимаем конструкционную сталь 45 по ГОСТ 1050–88 в состоянии поставки (200...220 НВ), серый чугун СЧ15 по ГОСТ 1412–85 (130...240 НВ) и алюминиевого сплава Д16 по ГОСТ 4784–2019 (120...140 НВ).

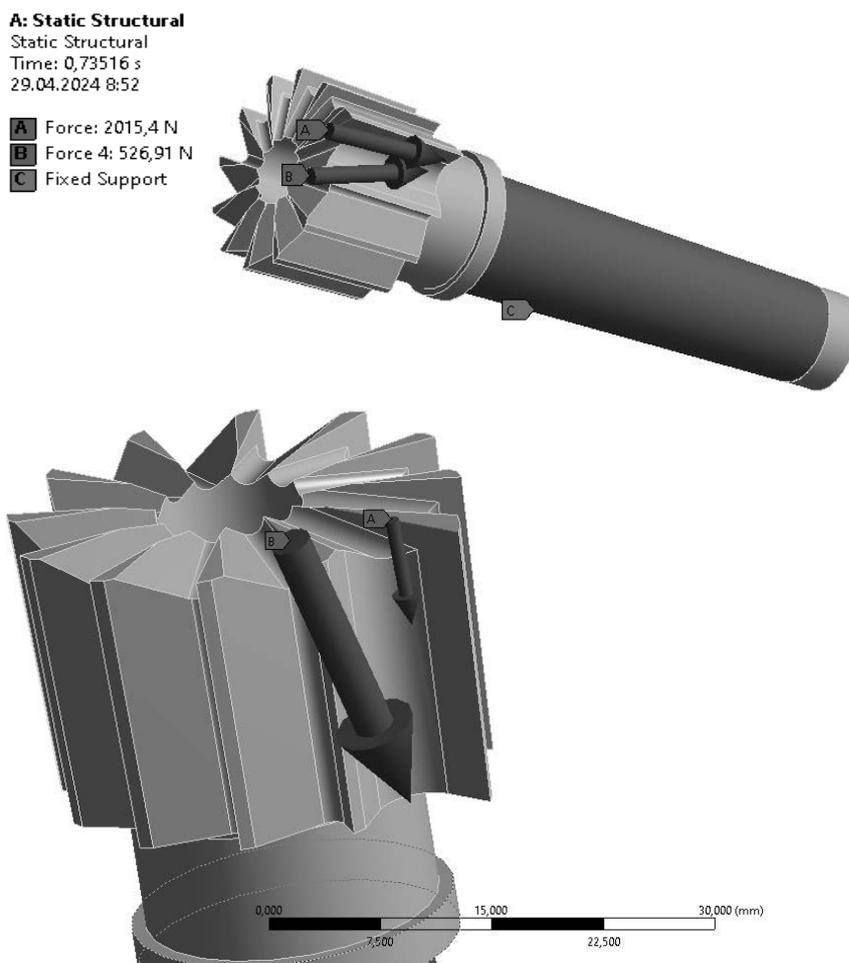


Рис. 3. Схема приложенных сил к режущим зубьям инструмента в программном продукте Ansys Static Structural при формировании квадратного отверстия с радиусом вписанной окружности 40 мм с предварительно просверленным круглым отверстием диаметром 39 мм

При моделировании процесса использовался метод конечных элементов, основанный на аппроксимации непрерывной величины, определенной бесконечным числом значений, дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе под областей, называемых конечными элементами.

В качестве конечных элементов применялся трехмерный тетраэдральный конечный элемент с размером ячейки до 0,5 мм.

Сгенерированная сетка конечных

элементов имеет различную размерность для каждого из элементов геометрической модели инструмента. Итог генерации сетки представлен на рис. 5 (69521 элемент в сетке).

Результаты моделирования

После необходимой подготовки запускаем расчет на статическую прочность при обработке алюминиевого сплава квадратного отверстия со вписанным диаметром 10 мм, результаты которого представлены на рис. 6.

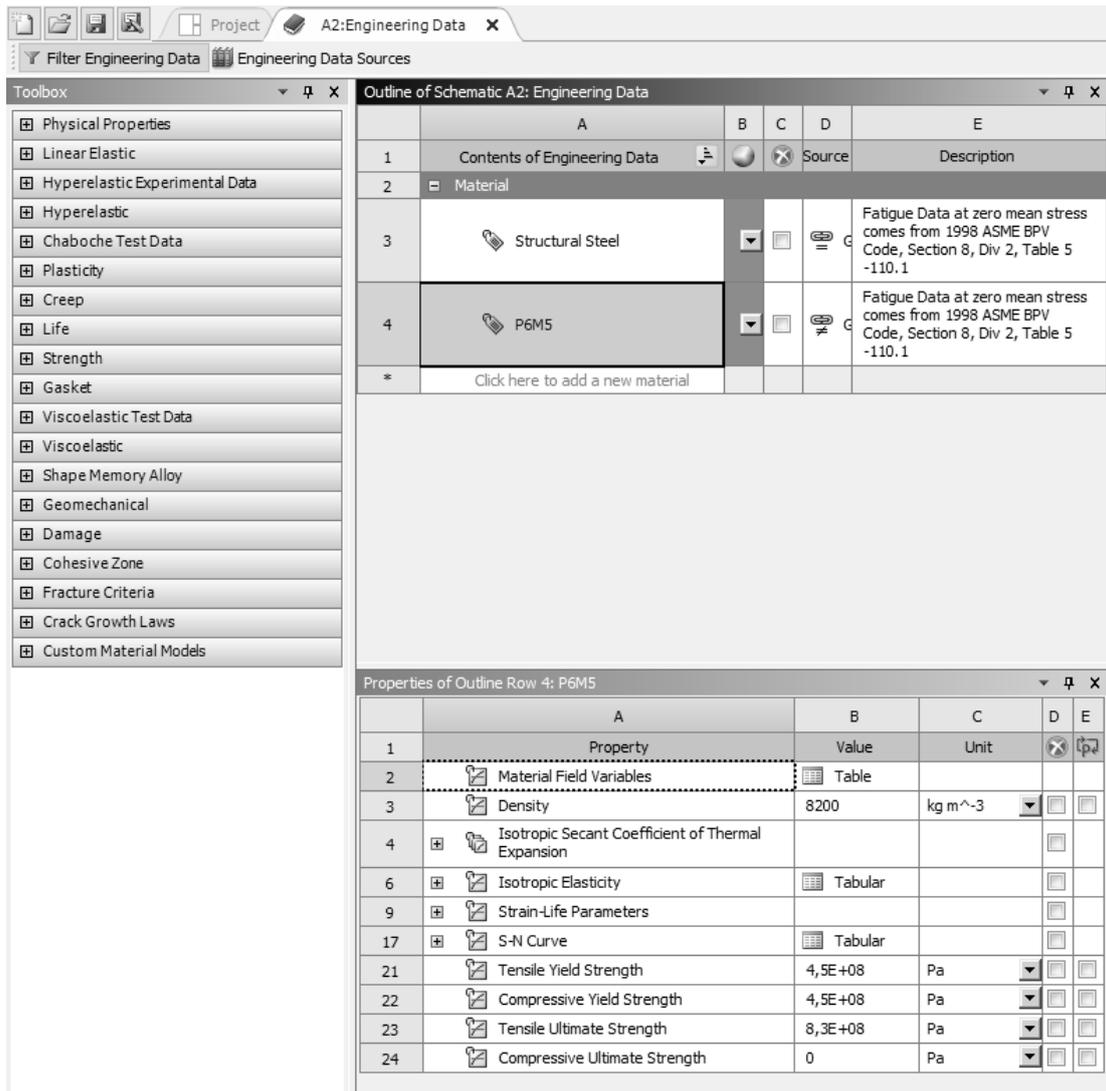


Рис. 4. Интерфейс программной системы анализа Ansys при задании свойств материала

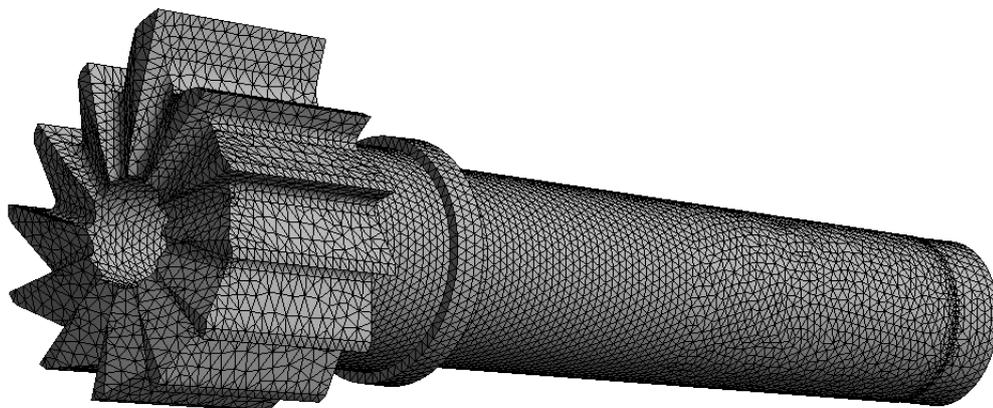


Рис. 5. Конечно-элементная модель режущего инструмента

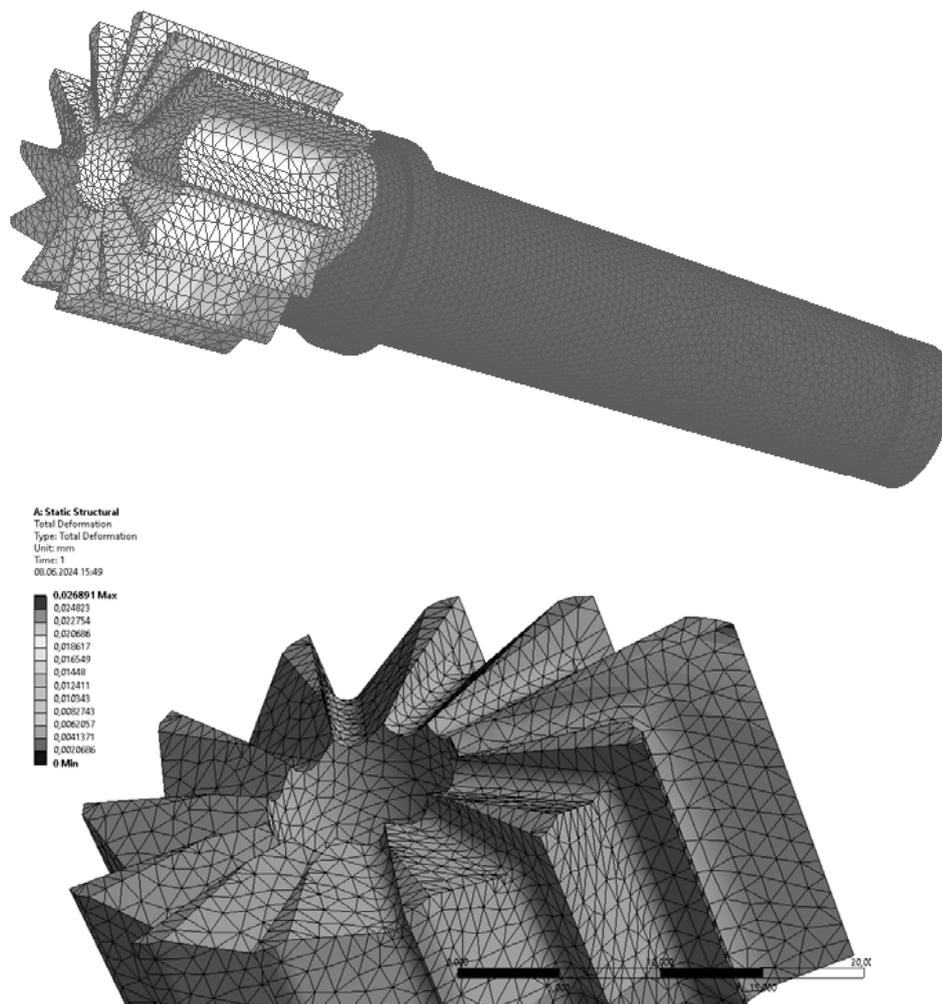


Рис. 6. Итоги компьютерной симуляции

Как видно из рисунка, в процессе обработки возможно смещение вершины рабочего (выступающего) зуба на 2 мкм под действием сил резания. Из этого можно сделать вывод, что силы, действующие на инструмент, не влияют на точность обработки по 9-му качеству вследствие достаточной прочности рабочего зуба инструмента.

Получим зависимость влияния размера обрабатываемого отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали, серого чугуна и алюминиевого сплава при формировании гранного отверстия с предварительно просверленным круглым отверстием диаметром меньшим диаметра вписан-

ной окружности $d_{ВП}$ на 1 мм (рис. 7, а) и без него (рис. 7, б).

Как видно из графиков, чем больше диаметр вписанной окружности обрабатываемых отверстий, тем большие силы действуют и на инструмент, и, как следствие, большие смещения вершины рабочего зуба. Из-за того, что при формировании гранного отверстия без предварительно просверленного отверстия зубьями снимается больше материала, силы резания значительно возрастают и, как следствие, возрастает величина смещения рабочего формообразующего зуба инструмента, что приводит к значительному снижению точности обработки гранного отверстия.

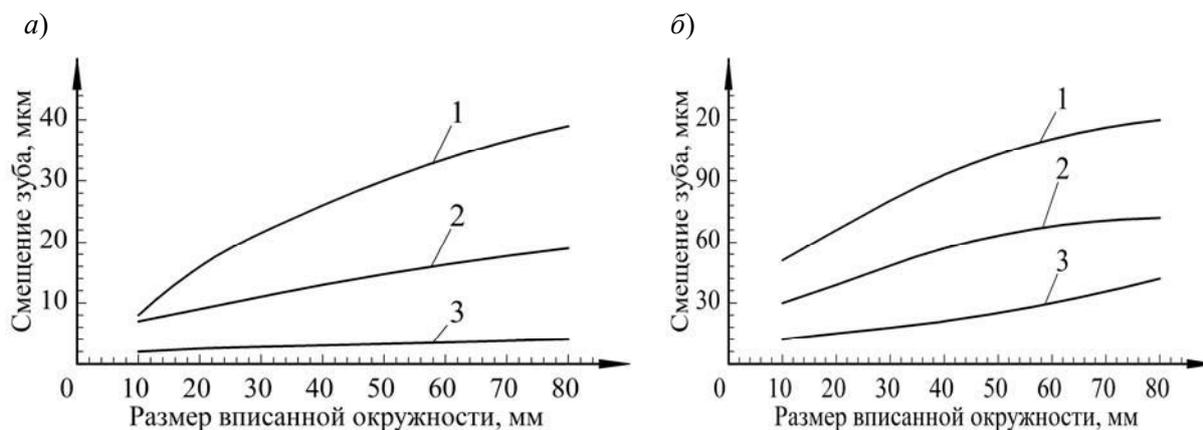


Рис. 7. Влияние размера вписанной окружности $d_{ВП}$ обрабатываемого четырехгранного отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали 1, серого чугуна 2 и алюминия 3 при формировании гранного отверстия как с предварительно просверленным круглым отверстием (а), так и при обработке без него (б)

Аналогичная картина наблюдается при формировании шестигранного отверстия тем же инструментом (рис. 8).

Стоит отметить, что предварительно просверленное отверстие при формировании шестигранного отверстия приводит к значительному снижению сил резания. При формировании шестигранного отверстия в сплошном металле силы резания, как и смещение режущей кромки, находятся в таких же пределах, как и при формировании квадратного отверстия.

Также важным фактором, возникающим во время механической обработки, является крутящий момент и мощность резания, от значения которых напрямую зависит выбор технологического оборудования. Составим таблицу возникающих при обработке квадратных отверстий крутящих моментов и мощностей резания (табл. 1) и сопоставим эти значения с техническими характеристиками некоторых фрезерных станков.

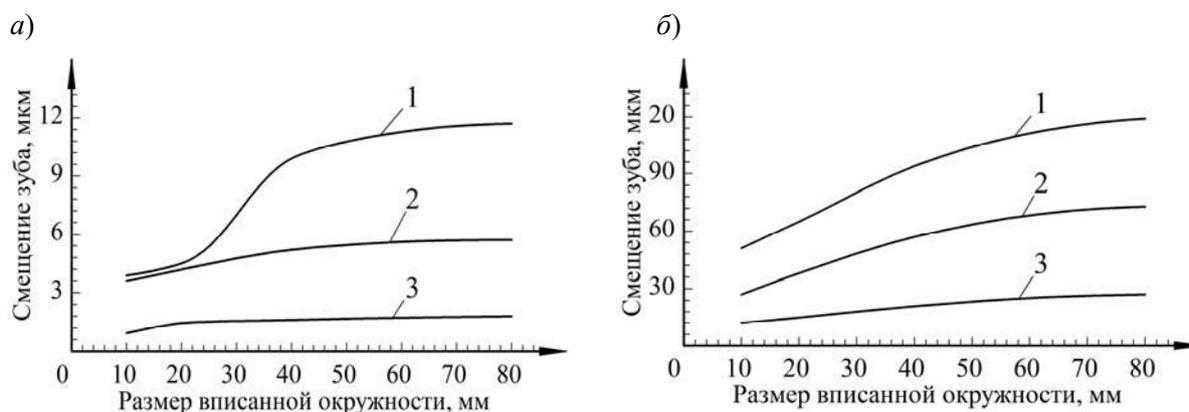


Рис. 8. Влияние размера вписанной окружности $d_{ВП}$ обрабатываемого шестигранного отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали 1, серого чугуна 2 и алюминия 3 при формировании гранного отверстия как с предварительно просверленным круглым отверстием (а), так и при обработке без него (б)

Табл. 1. Расчетные значения мощности резания и крутящего момента, возникающих при обработке квадратных отверстий с предварительно просверленным отверстием и без него*

Диаметр вписанной окружно- сти $d_{вп}$, мм	Гранное отверстие							
	квадратное				шестигранное			
	с предварительно просверленным отверстием		без предварительно просверленного отверстия		с предварительно просверленным отверстием		без предварительно просверленного отверстия	
	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м
Сталь 45								
10	0,066	1,48	0,215	4,8	0,025	0,45	0,215	4,8
20	0,100	7,13	0,336	23,97	0,042	2,54	0,336	23,97
40	0,170	38,5	0,551	124,64	0,077	14,87	0,551	124,64
80	0,265	195,57	0,790	582,84	0,124	78,97	0,790	582,84
Чугун СЧ15								
10	0,019	0,98	0,055	2,82	0,007	0,3	0,055	2,82
20	0,036	4,35	0,118	14,32	0,015	1,55	0,118	14,32
40	0,077	21,39	0,272	75,86	0,035	8,26	0,272	75,86
80	0,145	102,78	0,507	358,72	0,068	41,5	0,507	358,72
Алюминиевый сплав Д16								
10	0,009	0,26	0,037	1,09	0,004	0,1	0,037	1,09
20	0,013	1,14	0,062	5,45	0,007	0,48	0,062	5,45
40	0,022	5,55	0,114	28,36	0,012	2,51	0,114	28,36
80	0,031	25,01	0,164	132,63	0,017	11,75	0,164	132,63
Примечание – * – значения носят справочный характер и предназначены для демонстрации тенденции изменения крутящего момента и мощности резания для конкретных условий обработки и могут отличаться от значений, полученных экспериментальным путем								

Как видно из результатов расчета, при обработке гранных отверстий без предварительно просверленного отверстия гранность отверстия не оказывает влияния на крутящий момент и мощность резания и, напротив, предварительно просверленное отверстие значительно снижает указанные параметры.

На основании полученных значений крутящего момента и мощности резания можно подобрать оборудование для формирования отверстий необходимого размера и типа.

Так, например, исходя из данных, представленных основными производителями фрезерных станков, максимальный крутящий момент для стан-

ка ГФ2171NC составляет 615 Н·м, а допустимая мощность резания – 11 кВт, для станка DMTG VDLS600 соответственно 35,8 Н·м и 5,6 кВт.

Заключение

На основании моделирования процесса резания при получении гранных отверстий специальным осевым режущим инструментом как с предварительно просверленным отверстием, так и без него, показано, что данный способ может быть реализован на серийно выпускаемых фрезерных станках с ЧПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1968. – 392 с.

2. **Ящерицын, П. И.** Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.: ил.
3. Осевой инструмент и способ формирования гранного отверстия: пат. ВУ 24308 / В. М. Шеменков, С. Г. Полторацкий, М. А. Рабыко. – Опубл. 20.06.2024.
4. **Полторацкий, С. Г.** Формирование гранных отверстий осевым вращающимся инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 14–22.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 656 с.: ил.
6. **Гузеев, В. И.** Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник / В. И. Гузеев, И. Ф. Гущин, В. А. Батуев; под ред. В. И. Гузеева. – Москва: Машиностроение, 2005. – 368 с.
7. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 30 июля 2024 года

Контакты:

poltos17@gmail.com (Полторацкий Сергей Григорьевич);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович).

S. G. PALTARATSKI, V. M. SHEMENKOV

MODELING THE PROCESS OF FORMING FACETED HOLES WITH A SPECIAL AXIAL TOOL

Abstract

The paper presents the results of simulation modeling of the process of cutting faceted holes in different materials using a special axial tool to form the faceted hole profile of different facetedness.

Keywords:

trajectory, faceted hole, cutting force, torque.

For citation:

Paltaratski, S. G. Modeling the process of forming faceted holes with a special axial tool / S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 42–50.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-51-60

УДК 621

В. А. ПОПКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.**А. В. АЛЬХИМОВИЧ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШКИВА И ПОЛОГО ВАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОРЯЧЕЙ ПОСАДКИ**Аннотация**

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов образования поля остаточных напряжений при горячей посадке шкива на полый вал.

Ключевые слова:

компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, горячая посадка шкива на полый вал.

Для цитирования:

Попковский, В. А. Напряженно-деформированное состояние шкива и полового вала при использовании горячей посадки / В. А. Попковский, А. В. Альхимович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 51–60.

Введение

Одним из популярных технологических процессов, используемых для получения неразъемных соединений, является посадка деталей с натягом.

Такого рода соединения образуются в результате упругопластического деформирования деталей в процессе их

сборки из-за разности сопрягаемых размеров. В основном данный подход получения неразъемного соединения используется при сопряжении деталей по цилиндрическим поверхностям.

Сборка соединений с натягом осуществляется либо запрессовкой, либо нагревом охватывающей или охлаждением охватываемой детали (рис. 1).

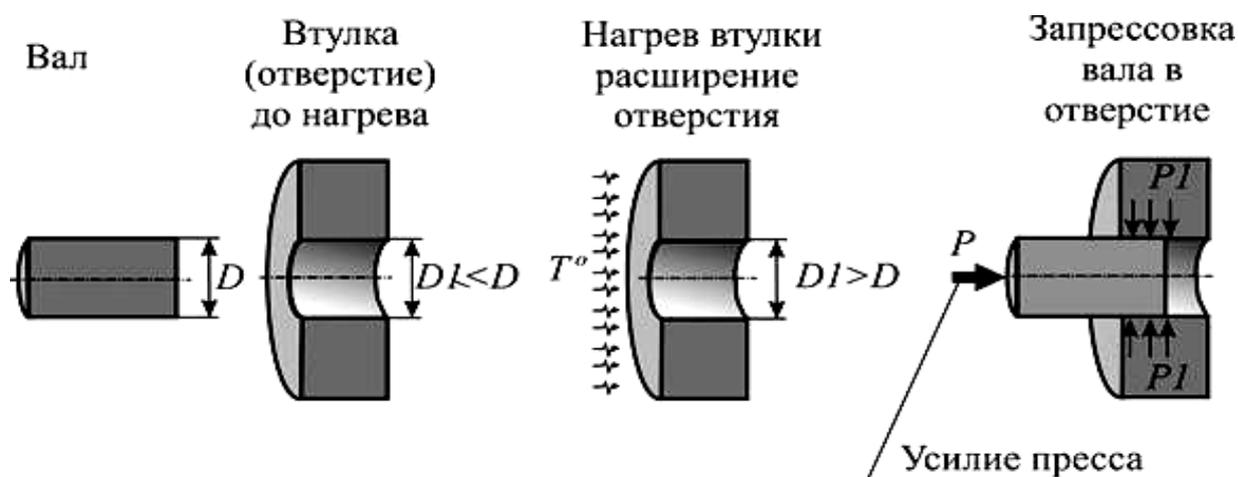


Рис. 1. Типы сборки соединений с натягом

Проведенные в этой области исследования показали, что прочностные характеристики соединений, полученных посредством использования температурного деформирования, в 1,5 выше, при прочих равных условиях, чем соединений, собираемых запрессовкой.

На посадочной поверхности сопрягаемых деталей в результате одной из таких операций возникает внутреннее давление p , которое за счет наличия сил трения противодействует внешним воздействиям осевой нагрузки P и крутящего момента $M_{кр}$ (рис. 2).

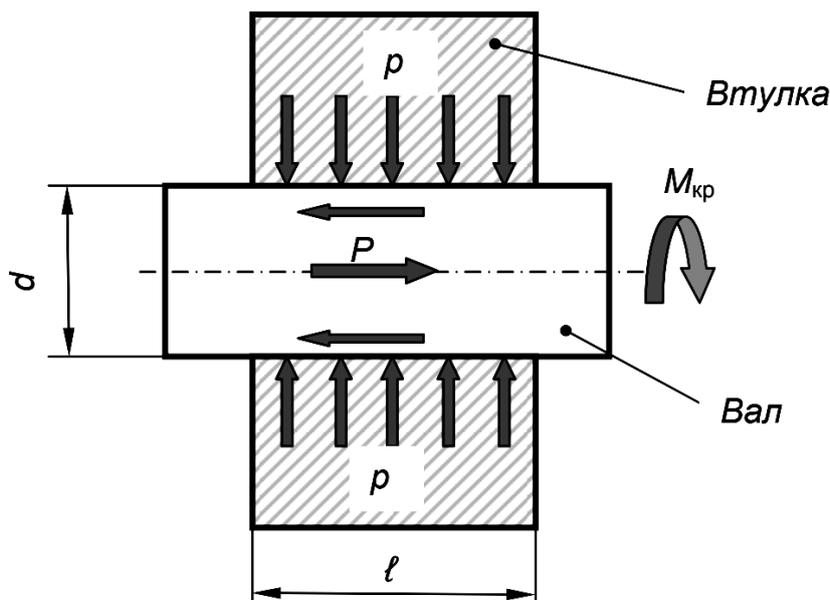


Рис. 2. Соединение деталей с натягом и действующие нагрузки

Значение минимального натяга p_{\min} может быть определено исходя из следующих соотношений:

– для обеспечения неразъёмности соединения от действия осевой нагрузки P

$$p_{\min} \geq \frac{P}{f \cdot \pi \cdot d \cdot l};$$

– при обеспечении противодействия максимальному крутящему моменту $M_{кр}$ это условие имеет вид

$$p_{\min} \geq \frac{2 \cdot M_{кр}}{f \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l};$$

– для случая совместного нагружения обеими внешними воздействиями расчет следует выполнять по формуле

$$p_{\min} \geq \frac{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot M_{кр}}{d}\right)^2 + P^2}}{f \cdot \pi \cdot d \cdot l},$$

где f – коэффициент трения в соединении, величина которого зависит от материала сопрягаемых деталей, шероховатости их поверхностей, значения внутреннего натяга. Значения коэффициентов трения f при различных покрытиях на стальных деталях приведены в табл. 1 [1–3].

Остановимся более подробно на температурной посадке деталей с натягом. Температура, до которой необходимо нагреть охватываемую деталь при практическом использовании данного типа посадки с натягом, находится в интервале 100 °С...400 °С. Конкретное значение используемой температуры

выбирается исходя из необходимой величины натяга, коэффициента температурного расширения материала изделия и посадочного диаметра кольцевой поверхности сопряжения. В случае сопряжения стальных деталей необходимая температура нагрева охватывающей детали может быть определена посредством использования следующей приближенной формулы:

$$T^{\circ} = (1350 / D + 90)^{\circ}C,$$

где D – посадочный диаметр детали, мм.

В результате наличия натяга p между сопрягаемыми деталями в них возникают радиальные σ_r и окружные σ_{θ} напряжения, эпюры распределения которых представлены на рис. 3.

Табл. 1. Значения коэффициентов трения

Покрытие	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	Без покрытия	
						Сборка прессованием	Нагревом или охлаждением
f	$\frac{0,45}{0,51}$	$\frac{0,48}{0,63}$	$\frac{0,54}{0,70}$	$\frac{0,72}{0,54}$	$\frac{0,85}{0,46}$	0,1	0,15

Примечание – В числителе даны значения коэффициентов трения в соединении, полученном сборкой под прессом, а в знаменателе – при сборке с охлаждением вала

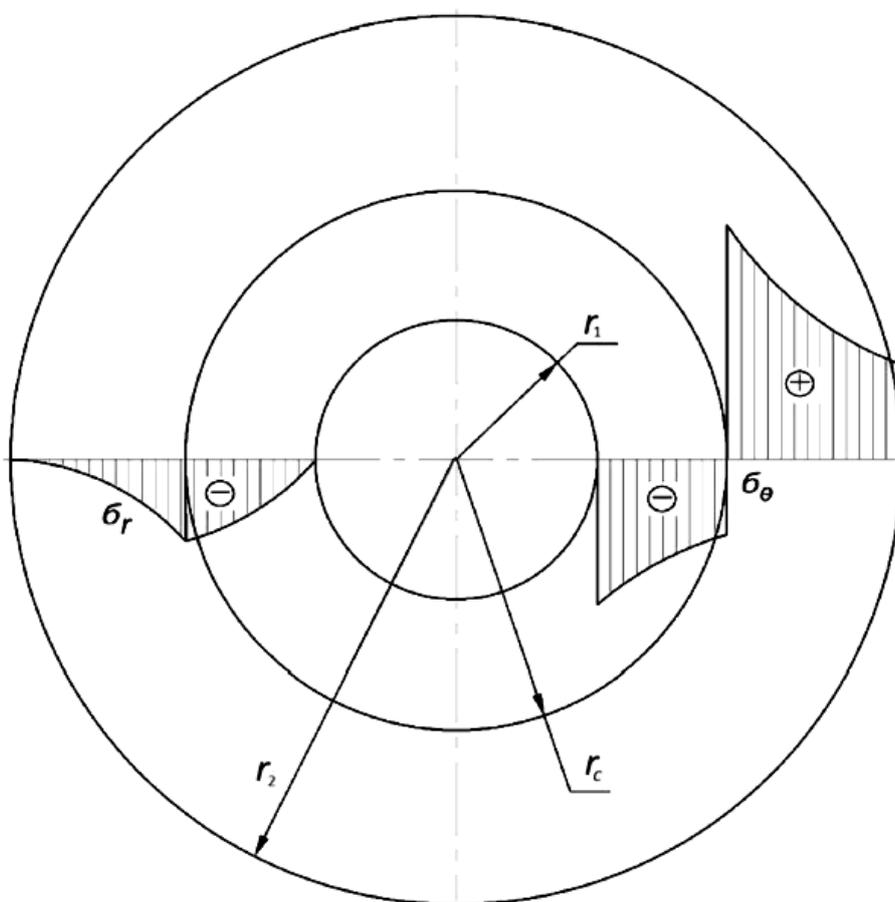


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений в соединении цилиндрических деталей с натягом

Приведенное распределение напряжений (см. рис. 3) было получено в [4] в предположении, что в сопрягаемых деталях реализуется осесимметричное плоское напряженное состояние и действующие напряжения не превышают предела текучести σ_T .

В реальных изделиях такого рода напряженно-деформированное состояние существенно отличается от осесимметричного плоского напряженного. Особенно это касается областей, в которых может проявляться концевой эф-

фект. Значительное влияние на характер распределения остаточных напряжений могут оказывать также упругопластическое деформирование сопрягаемых материалов и нестационарное объемное температурное поле в процессе охлаждения при горячей посадке деталей.

Предметом проводимых в последующем исследований являлся анализ поля остаточных напряжений, возникающих при горячей посадке шкива на полый вал (рис. 4).

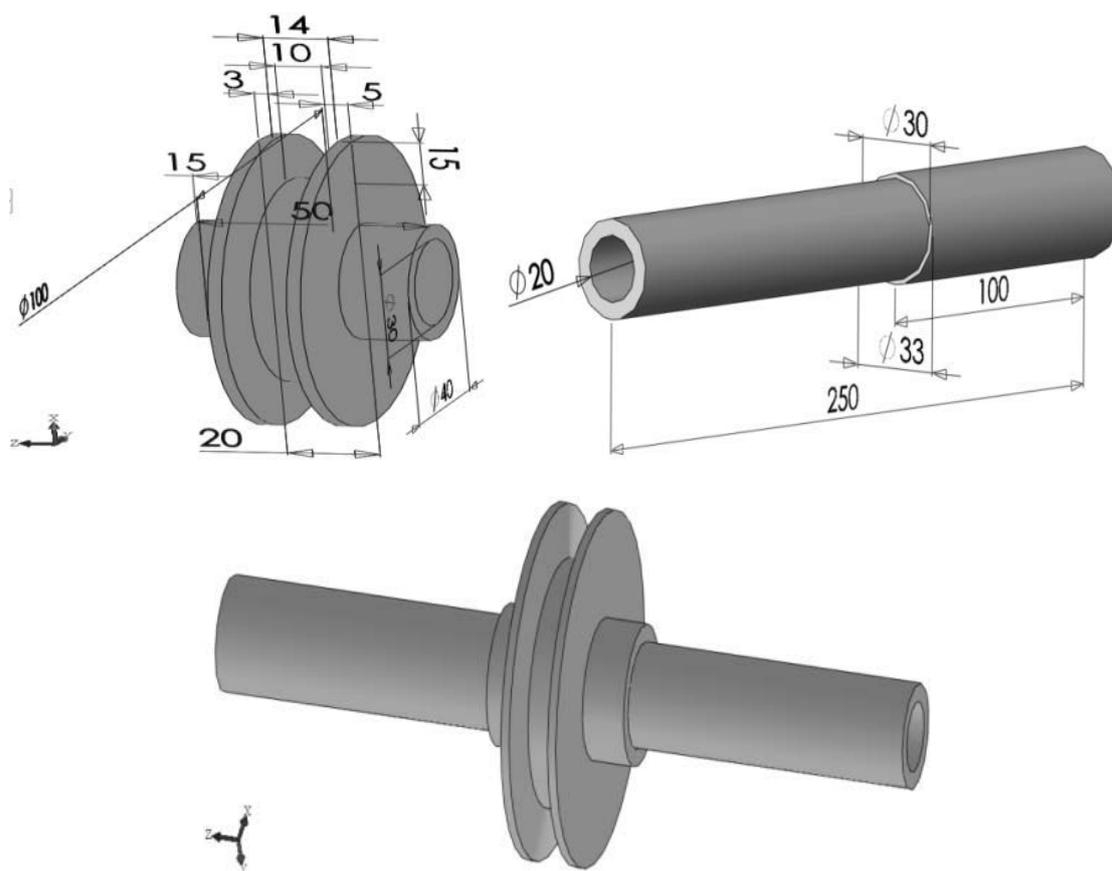


Рис. 4. Сборка деталей «шкив – полый вал», рассматриваемая для анализа поля остаточных напряжений при горячей посадке

Анализ напряженно-деформированного рассматриваемого изделия осуществлялся посредством использования метода конечных элементов, хорошо зарекомендовавшего себя при решении сложных прикладных задач, алгоритм которого реализован в компьютерной

системе SolidWorks Simulation.

Рассмотрение данного процесса в первом приближении базировалось на использовании следующих допущений:

- теплофизические свойства материала являются независимыми параметрами от температуры;

- материал шкива и полого вала одинаков – сталь Ст3;
- шкив равномерно нагрет перед посадкой до температуры 100 °С;
- в момент посадки наружный диаметр полого вала и внутренний диаметр шкива одинаковы;
- остывание шкива осуществляется равномерно по объему без теплопередачи полому валу;
- алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния сборки

базируется на линейной постановке задачи (считается справедливым закон Гука).

Используя указанные допущения, была разработана конечно-элементная модель горячей посадки шкива на вал (рис. 5).

В результате проведения численного анализа было установлено распределение напряжений Von Mises (рис. 6).

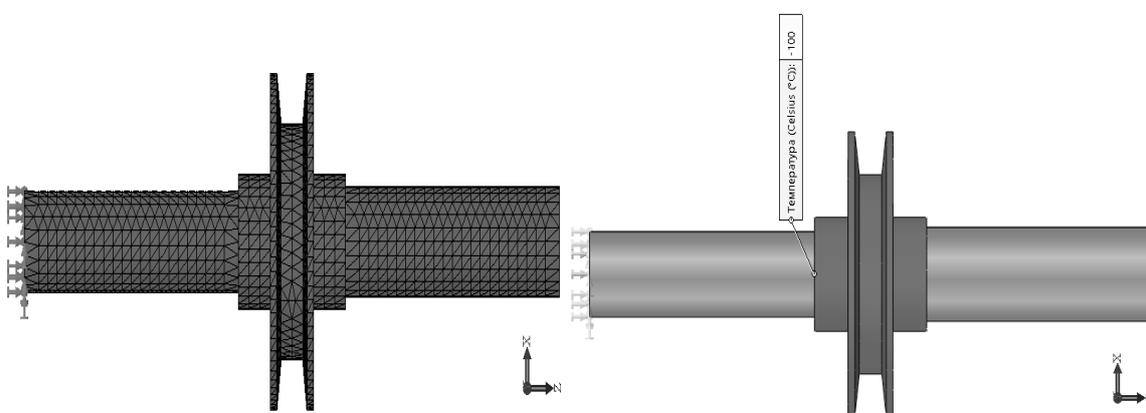


Рис. 5. Конечно-элементная модель горячей посадки шкива на вал

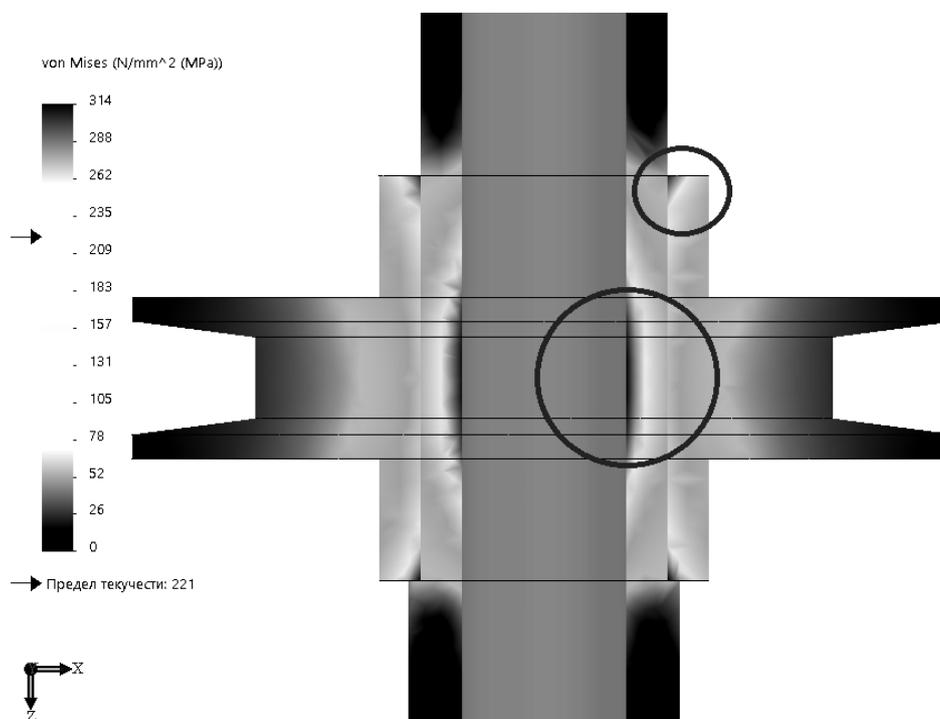


Рис. 6. Эпюра распределения остаточных напряжений Von Mises

Следует отметить, что напряжения Von Mises – это интегральный показате-

ль, который учитывает все шесть компонент напряжений.

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Эпюра напряжений Von Mises позволяет в целом оценивать уровень нагруженности материала изделия во всех точках его объема. На рис. 6 показана эпюра распределения напряжений Von Mises по площади сечения соединения «полый вал – ступица», совпадающего с осью вращения. Как и предполагалось, наиболее нагруженными областями явились зоны, выделенные кружками (см. рис. 6), места резкого изменения жесткостных характеристик в радиальном направлении. Кроме того, судя по значениям максимальных напряжений (см. рис. 6), можно говорить о том, что материал соединения претерпевает упругопластическое деформиро-

вание.

Следует отметить, что в соответствии с используемой глобальной системой координат (см. рис. 6) нормальные напряжения, действующие в направлении оси X , в данном сечении одновременно являются радиальными напряжениями для цилиндрического соединения, т. е. $\sigma_x = \sigma_r$, а напряжения, действующие в направлении оси Y , совпадают с окружными напряжениями, т. е. $\sigma_y = \sigma_\theta$.

На рис. 7 и 8 приведены соответственно эпюры распределения радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений по площади сечения.

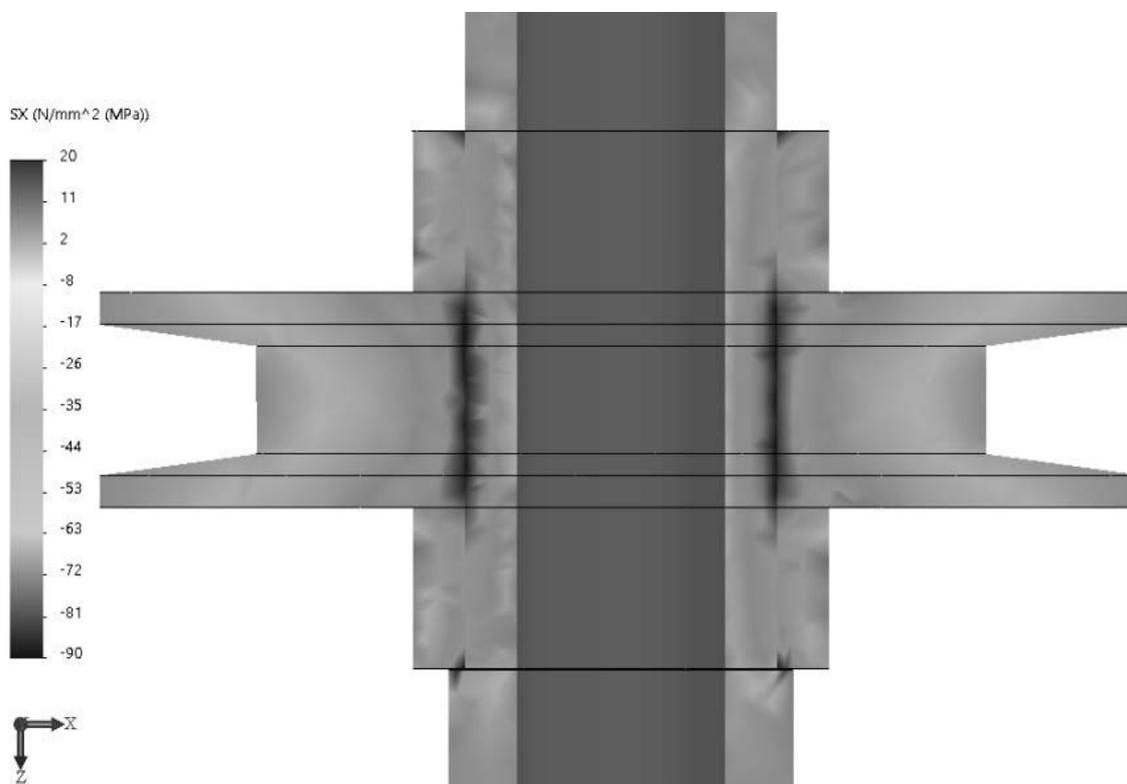


Рис. 7. Эпюра распределения радиальных остаточных напряжений по площади сечения

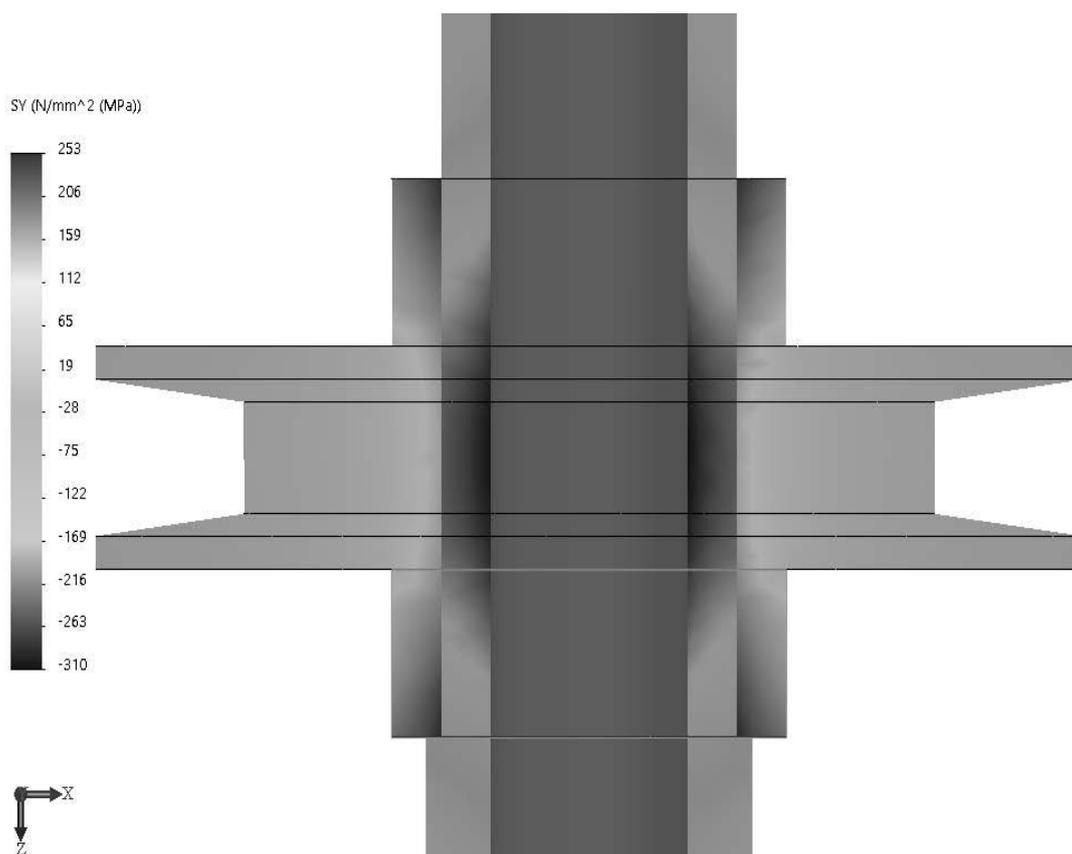


Рис. 8. Эпюра распределения окружных остаточных напряжений по площади сечения

Для сопоставления полученных результатов распределения напряжений по радиусу с данными аналитических расчетов [4] (см. рис. 3) воспользуемся опцией *Зондирование* компьютерной системы SolidWorks Simulation. На рис. 9 и 10 приведены точки зондирования и соответствующие графики изменения компонент остаточных нормальных напряжений по толщине соединения.

Сопоставление данных, полученных посредством использования аналитического подхода [4] (см. рис. 3), и результатов численного анализа (см. рис. 9 и 10) говорит о достаточно хорошем согласовании соответствующих графиков и таким образом подтверждает верность созданной конечно-элементной модели.

С другой стороны, проведенный численный анализ показал, что наряду с радиальными и окружными напряжениями (см. рис. 9 и 10) в зоне контакта системы «полый вал – ступица», в результате горячей посадки, имеют место значительные осевые остаточные нормальные напряжения (рис. 11). Данное обстоятельство позволяет заключить, что напряженно-деформированное состояние в общем случае горячей посадки существенно отличается от плоского напряженного состояния и, по сути, является осесимметричным объемным напряженным состоянием. Это необходимо учитывать при анализе закономерностей образования поля остаточных напряжений, образуемых в результате горячей посадки.

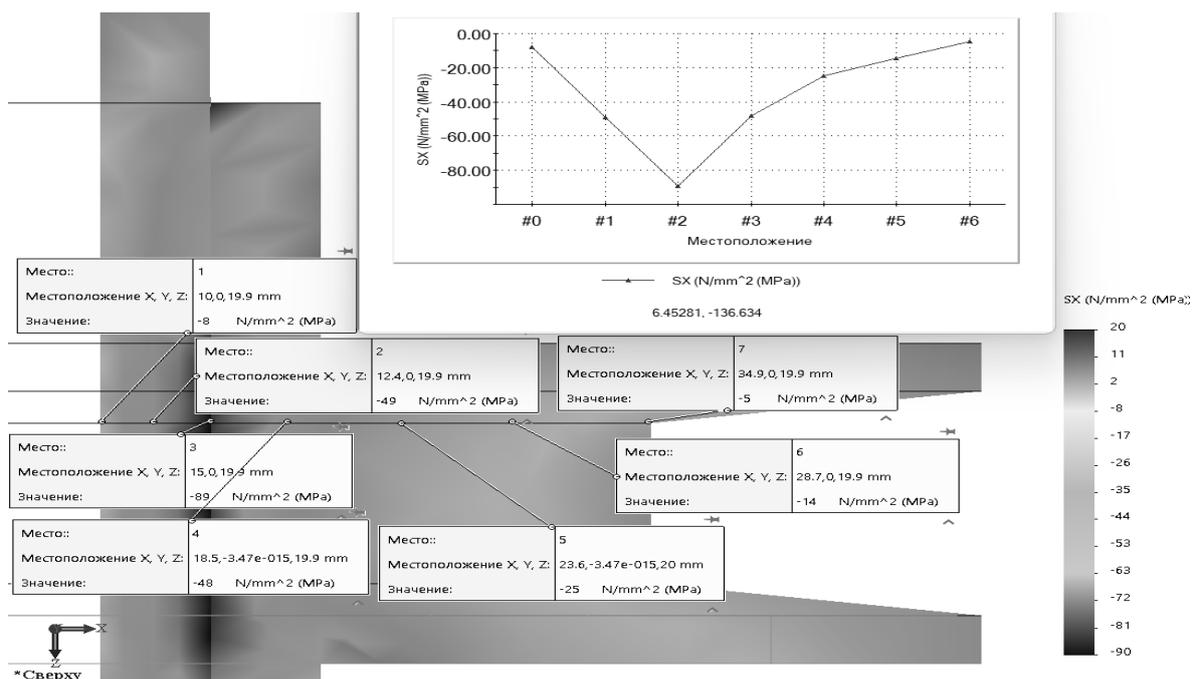


Рис. 9. График изменения радиальных остаточных напряжений по толщине соединения

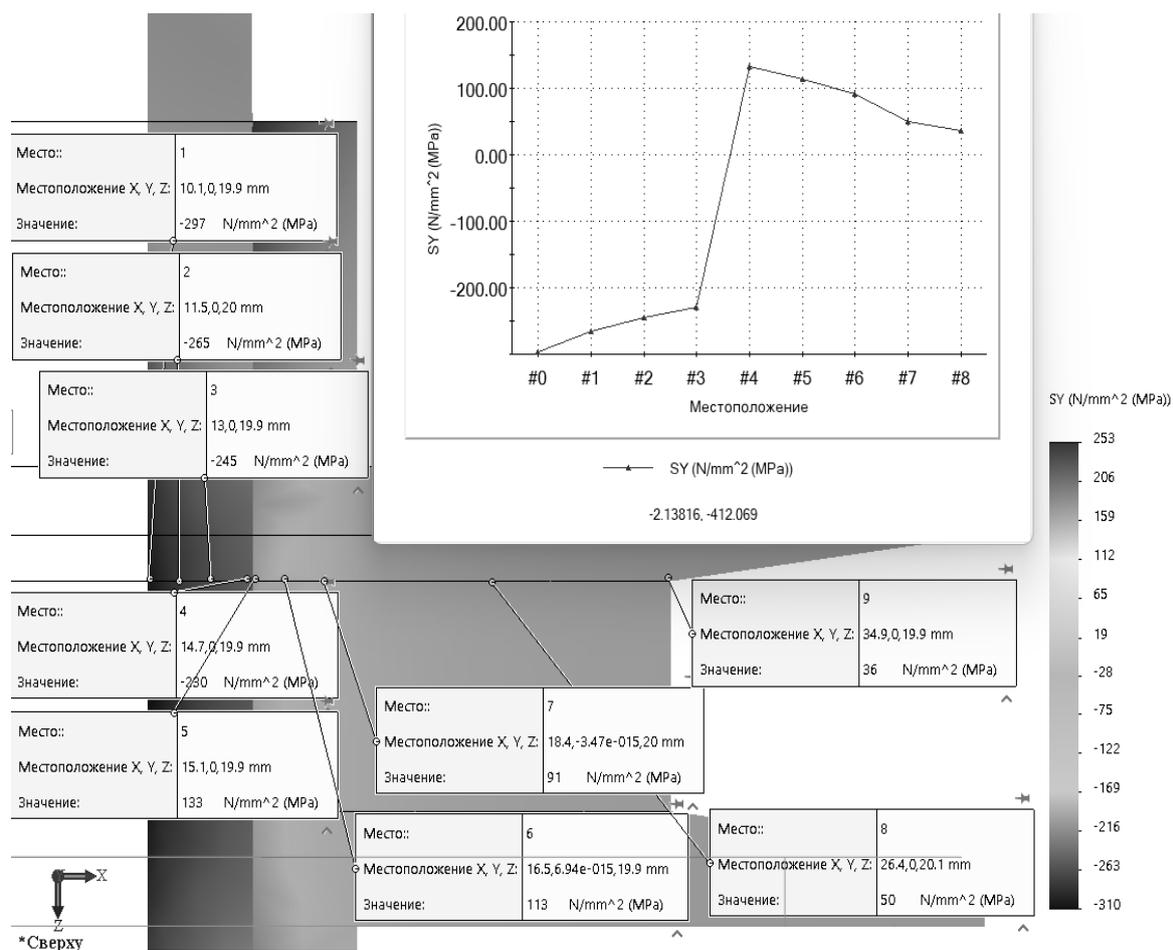


Рис. 10. График изменения окружных остаточных напряжений по толщине соединения

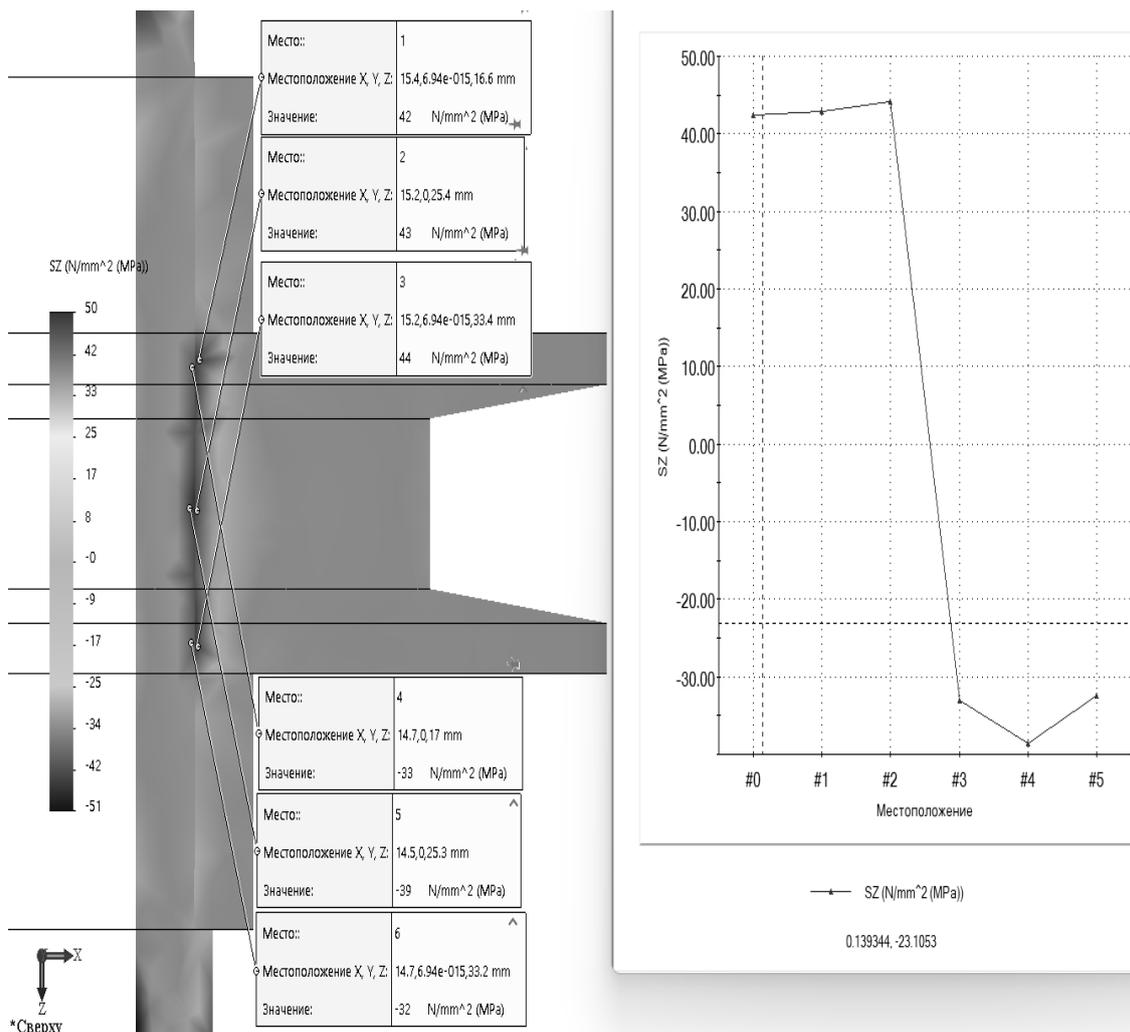


Рис. 11. Места зондирования и график изменения осевых остаточных напряжений, образуемых в результате горячей посадки в зоне контакта системы «полый вал – ступица»

Выводы

По результатам проведенного численного имитационного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Разработана 3D-модель неразъемного соединения системы «полый вал – ступица».

2. Создана конечно-элементная модель горячей посадки ступицы на полый вал, позволяющая в первом приближении провести анализ напряженно-деформированного состояния получаемого соединения в линейной постановке зависимости напряжения – деформации.

3. Сопоставительный анализ полу-

ченного поля остаточных напряжений с известными данными аналитических расчетов [4] показал достаточно хорошее совпадение характера его распределения, что подтверждает правомочность использования предлагаемой конечно-элементной модели.

4. Данные аналитических расчетов базировались на предположении об упругом деформировании материала и на том, что в рассматриваемом соединении реализуется плоское напряженное состояние. Вместе с тем проведенный численный анализ показал, что даже при предварительном нагреве ступицы до температуры 100 °С в соединении

возникают упруго-пластические деформации и поле остаточных напряжений существенно отличается от плоского напряженного состояния.

5. Проведенные исследования позволили сформулировать следующие требования к созданию усовершенствованной модели образования неразъемного соединения при горячей посадке системы «полюй вал – ступица»:

– модель должна учитывать возможность упругопластического де-

формирования материала деталей соединения;

– в модели должно рассматриваться нестационарное температурное поле процесса охлаждения ступицы на воздухе и теплопередачи от нее в полюй вал;

– в модели должна быть предусмотрена возможность учета зависимости теплофизических свойств материалов соединения от температуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов, П. И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие: в 2 кн. / П. И. Орлов; под ред. П. Н. Учаева. – 3-е изд., испр. – Москва: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 544 с.: ил.
2. Иванов, М. Н. Детали машин: учебник для академического бакалавриата / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 15-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2015. – 408 с.: ил.
3. Удалов, А. В. Контактные давления в прессовых соединениях вала и ступицы / А. В. Удалов, А. А. Удалов // Математический вестн. Вятского гос. ун-та. – 2017. – № 4.
4. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2024 года

Контакты:

viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович);

lеха8787898@gmail.ru (Альхимович Алексей Викторович).

V. A. POPKOVSKY, A. V. ALKHMIVICH

STRESS-STRAIN STATE OF A PULLEY AND HOLLOW SHAFT WHEN USING HOT FITTING

Abstract

The results of computer simulation of the formation of a residual stress field during hot fitting of a pulley on a hollow shaft by using the finite element method are presented.

Keywords:

computer modeling, finite element method, stress-strain state, hot fitting of a pulley on a hollow shaft.

For citation:

Popkovsky, V. A. Stress-strain state of a pulley and hollow shaft when using hot fitting / V. A. Popkovsky, A. V. Alkhimovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 51–60.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-61-71

УДК 55.09.43

А. С. ФЕДОСЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В. А. БЕЛЯКОВИЧ

И. К. АНДРЕЕВ

А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ СПОСОБОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ, И ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ НИХ

Аннотация

Приведены результаты исследований, направленных на разработку композиционных порошков на керамической основе, изготавливаемых с применением способа механического легирования, а также технология их подготовки для высокопроизводительного напыления плазменных покрытий. Представлены результаты исследований характеристик порошков, их фазового состава и морфологии. Рассмотрены результаты изучения структуры и свойства покрытий.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, плазменное напыление, композиционный порошок, износостойкость, керамические покрытия, металлокерамика.

Для цитирования:

Металлокерамические порошки, полученные способом механического легирования, и плазменные покрытия из них / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, В. А. Белякович, И. К. Андреев, А. С. Оленцевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 61–71.

Введение

Нанесение керамических плазменных покрытий – эффективный способ защиты рабочих поверхностей деталей машин и оборудования от воздействия высоких температур, агрессивных веществ, абразивного и прочих видов износа.

Среди керамических материалов наибольшее распространение получили порошки оксида алюминия с добавкой оксида титана или без него. Они используются для формирования газотермических покрытий, отличающихся высокой твердостью, износостойкостью, а также низкой теплопроводностью. Существенными недостатками таких покрытий являются невысокая прочность сцепления с подложкой и низкая пластичность. Как правило, требуемое значение прочности сцепления достигается

использованием промежуточных слоев, в качестве которых чаще всего используют материалы системы «никель – алюминий». При этом склонность самих покрытий к образованию трещин, растрескиванию и расслоению сохраняется.

Наиболее перспективным типом материалов для получения высокостойких покрытий, способных выдерживать экстремальные условия работы, является композиционная металлокерамика. Введение металлической добавки способствует увеличению вязкости, устойчивости к тепловым ударам и деформациям, а керамическая основа обеспечивает высокие твердость и износостойкость.

Многолетние исследования показали, что металлокерамические порошки могут быть с успехом получены способом, основанным на реакционном ме-

ханическом легировании. Он хорошо изучен в [1] и демонстрирует уникальные результаты на различных группах материалов.

Большинство выпускаемых керамических и металлокерамических порошков имеют свои недостатки, среди которых следует выделить низкую сыпучесть. Это требует дополнительных приемов при подготовке порошка перед напылением, а также корректировки режимов работы оборудования.

При дозировании и подаче керамических порошков в плазменную струю часто приходится сталкиваться с трудностями, связанными с зависанием в бункере питателя, налипанием на его стенки и поверхности воздушно-порошкового тракта. Это существенно затрудняет стабильную подачу материала, ухудшая качество покрытий и снижая эффективность процесса.

В некоторой степени данные недостатки устраняются корректировкой режима дозирования порошка в сторону уменьшения его расхода в единицу времени, однако это значительно снижает производительность процесса и увеличивает затраты электроэнергии. Как отмечают исследователи, на разогрев и разгон частиц напыляемого материала затрачивается не более 8 % всей энергии, потребляемой плазмотроном [2]. Определенное увеличение эффективности процесса может быть достигнуто использованием нескольких подающих трубок [3, 4], однако это существенно усложняет конструкцию оборудования и процесс его обслуживания.

Таким образом, в настоящее время остается актуальным вопрос повышения эффективности процесса плазменного напыления покрытий из порошков на основе керамики. Разработка технологии, позволяющей увеличить производительность процесса напыления керамических порошков и снизить энергопотребление процесса, позволит расширить область применения таких покрытий, сделает их использование рента-

бельным.

Цель исследования – разработка эффективного способа получения композиционных порошков на основе оксидной керамики, а также формирование плазменных покрытий из них.

Материалы, оборудование, приборы и методика исследований

Исследования проводились на керамических материалах на основе оксида алюминия. В качестве основной добавки вводили оксид титана в количестве 13 %. С целью увеличения пластичности, адгезионной и когезионной прочности в композиции дополнительно вводили никель в количестве 10 %.

Для получения гомогенных композиционных порошков, в том числе содержащих никель, был применен способ реакционного механического легирования. Он позволяет получать порошки, содержащие равномерно распределенную добавку металла, количество которой не ограничено технологией получения материала.

В качестве оксида алюминия использовался порошок нормального электрокорунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), оксид титана добавляли в виде соединения TiO_2 (рутил), поставщиком никеля являлся порошок марки ПНК-ОНТ2. Средний размер частиц исходных порошков составил 20, 5 и 15 мкм соответственно.

Механосинтез порошков проводили в энергонапряженной вибрационной мельнице гирационного типа, оснащенной четырьмя водоохлаждаемыми камерами общим объемом 4000 см³. Круговая частота колебания камер составляла 30 с⁻¹. В качестве рабочих тел использовали шары диаметром (9 ± 0,5) мм из закаленной стали ШХ15. Механосинтез проводили на следующих режимах: ускорение рабочих тел – 130 м·с⁻²; степень заполнения помольной камеры рабочими телами – 75 %...80 %; отношение объема рабочих тел к объему обра-

батываемой шихты – 8; продолжительность обработки – 8 ч.

Напыление плазменных покрытий осуществлялось дуговым плазмотроном, работающим на высокоэнтальпийной воздушно-пропановой газовой смеси. Порошок подавался из бункера питателя по одному воздушно-порошковому тракту на срез сопла. Расстояние от среза сопла до центральной оси подающей трубки – 5 мм. Расстояние от среза подающей трубки до плазменного потока – 5 мм. Источником питания плазмотрона являлась установка АПР 404.

Покрытие наносилось на водоохлаждаемые образцы квадратного сечения с размером стороны 20 мм, изготовленные из стали Ст3пс. Толщина стенки, на которую наносили покрытие, составляла 0,5...0,7 мм. Образец устанавливался неподвижно. Перемещение плазмотрона осуществлялось со скоростью 100 мм/с. Расстояние от среза сопла до образца составляло 120 мм. Сила тока, потребляемая плазмотроном, – 210...230 А, напряжение – 210 В.

Металлографический анализ проводился на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II SBH (Чехия). Исследование элементного состава проводилось на сканирующих электронных микроско-

пах Tescan VEGA II SBH (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 350/XT с безазотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади.

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3М в $\text{CoK}\alpha$ -излучении в режиме сканирования (по точкам) с шагом $0,1^\circ$.

Результаты исследования

Морфология, структура и фазовый состав механически легированных порошков. В соответствии с классификацией, представленной в [1], керамические композиции относятся к третьей категории материалов, в которых в процессе механосинтеза на всем интервале обработки превалирует измельчение компонентов, сопровождающееся гомогенизацией по составу.

Результатом обработки металло-керамической шихты в механореакторе является композиционный порошок (рис. 1), состоящий из частиц, размер и форму которых можно оценить по изображениям, полученным с помощью сканирующей электронной микроскопии.

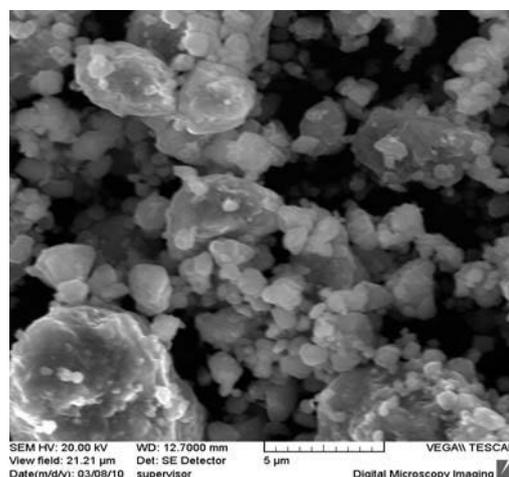
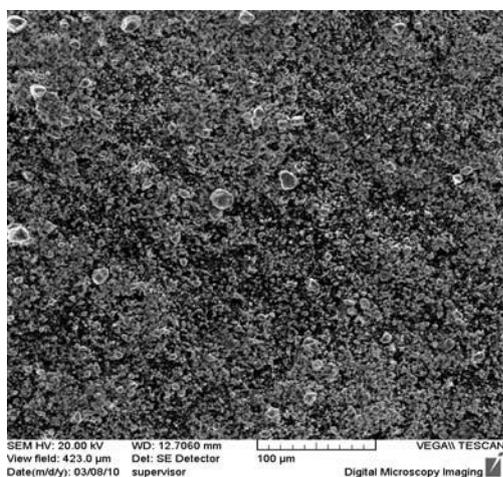


Рис. 1. Форма, размер и морфология частиц механически легированного порошка состава $78\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$

Как видно, частицы синтезированных материалов имеют угловатую форму с размерами, близкими во всех пространственных направлениях. Основная масса частиц в поперечном сечении не превышает 5 мкм, однако наблюдается присутствие отдельных конгломерированных частиц с размером до 20 мкм.

Применение разработанных механически легированных мелкодисперсных порошков позволит снизить минимально возможную толщину формируемых покрытий. Помимо этого, они будут отличаться меньшей пористостью, что позволит увеличить их механические и эксплуатационные характеристики.

Согласно рентгеноструктурным исследованиям, обработка керамической композиции в механореакторе сопровождается уменьшением пиков, относящихся к оксиду титана (TiO_2 , рутил), что обусловлено образованием сложного оксида Al_2TiO_5 , а также переходом его в аморфное состояние. Также наблюдается уменьшение пиков, принадлежащих никелю и корунду, что свидетельствует об уменьшении размера зерен и субзерен. В результате механосинтеза область когерентного рассеивания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ уменьшается в 2,5 раза, а плотность дислокаций возрастает с $2,7 \cdot 10^8$ до $1,2 \cdot 10^9$ см^{-2} . Параметры решетки низкотемпературной фазы оксида алюминия составляют: $a = 4,761991$ Å; $b = 13,01613$ Å.

Покрyтия из разработанных металлокерамических порошков

В качестве эталона для оценки результатов, полученных при исследовании покрытий из разработанных механически легированных порошков, использовали керамическую композицию $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$, представляющую собой механическую смесь компонентов, частицы которых объединены между собой в конгломераты небольшим количеством связующего. Были изучены микроструктура получаемого покрытия

и его склонность к растрескиванию и отслоению от подложки в процессе изгиба.

В процессе экспериментов было установлено, что покрытия из композиционного порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$, выбранного в качестве базового и прошедшего операцию механического легирования, отличаются меньшей склонностью к растрескиванию. Данная закономерность характерна как для случаев перегрева напыленного слоя, так и для случаев формирования слоев большой толщины. Последнее наиболее часто способствует образованию трещин в керамических материалах.

Зачастую покрытия, получаемые напылением глинозема или механической смеси глинозема и рутила, пронизаны сплошной сеткой микро- и макротрещин, что наблюдается даже при незначительном отклонении от оптимальных режимов нанесения слоя (рис. 2, а). При этом стоит добавить, что микротрещины присутствуют и при оптимальных условиях напыления (рис. 2, б). Гомогенизация и выравнивание частиц по размеру, сопровождающие процесс обработки в механореакторе, не позволяют получать покрытия без трещин, однако наблюдается существенное снижение их количества на макроуровне (рис. 3).

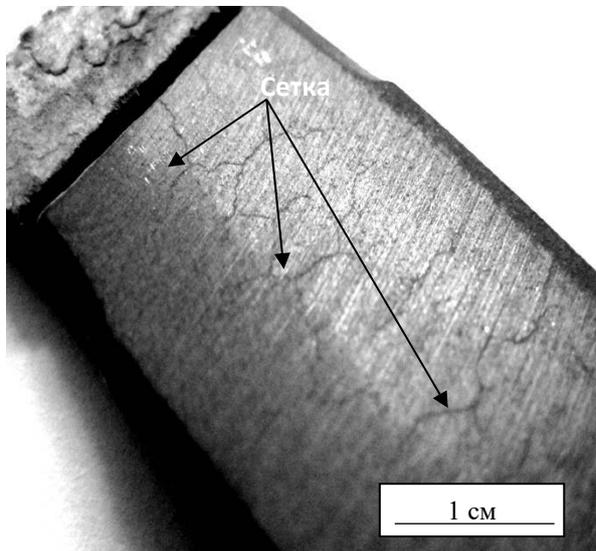
Для получения покрытий с минимальным количеством трещин на микроуровне и полностью лишенных макротрещин наиболее перспективно использование композиционных порошков, содержащих небольшое количество пластичных компонентов. С этой целью в состав керамической основы вводили алюминий и/или никель. Их присутствие в порошке обеспечивает армирующий эффект и способствует снижению внутренних напряжений за счет равномерного распределения по границам зерен хрупкой матрицы, что позволит увеличить стойкость к тепловым ударам и вязкость, а также снизить склонность к отслоению.

Исследования микроструктуры

показали, что присутствие металлической добавки полностью избавляет покрытие от трещин на макроуровне в

случае напыления при оптимальных условиях (рис. 4).

а)



б)

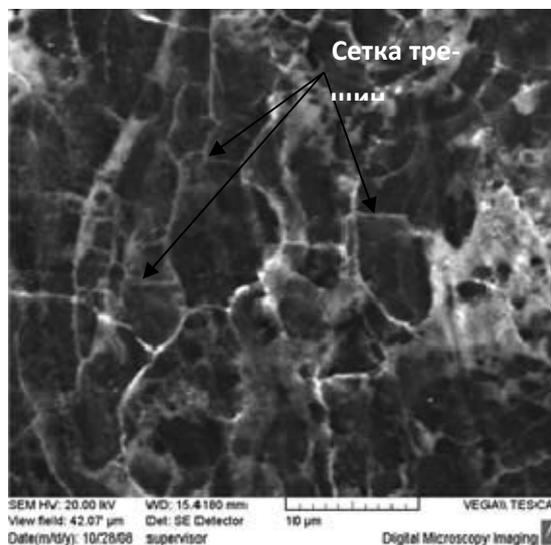


Рис. 2. Структура керамического покрытия, полученного плазменным напылением механической смеси порошков $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$

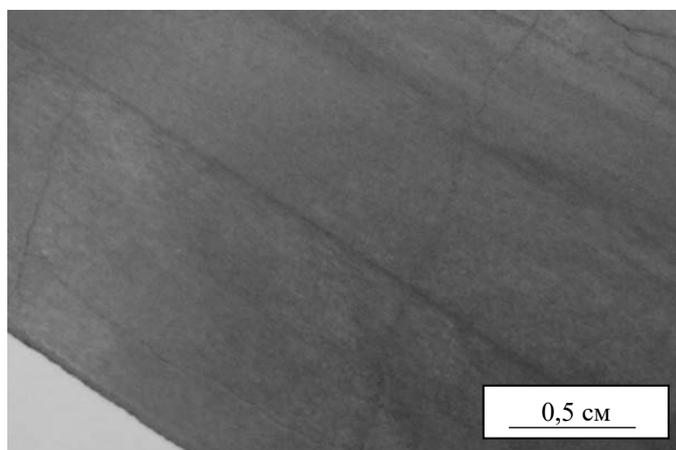


Рис. 3. Плазменное покрытие из механически легированного порошка состава $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$

Полученный результат объясняется тем, что вводимый в исходную композицию металл в ходе обработки в механореакторе равномерно распределяется в керамической основе, создавая плакирующий слой на поверхности частиц, зерен и субзерен. В процессе

напыления механически легированного металллокерамического порошка в объеме покрытия формируются тончайшие прослойки, обогащенные металлом, толщиной менее 1 мкм (рис. 5), которые обеспечивают релаксацию внутренних напряжений.

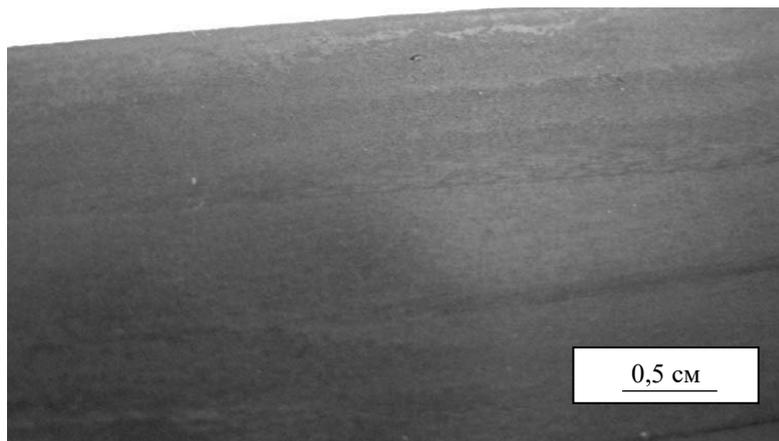


Рис. 4. Плазменное покрытие из механически легированного порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$

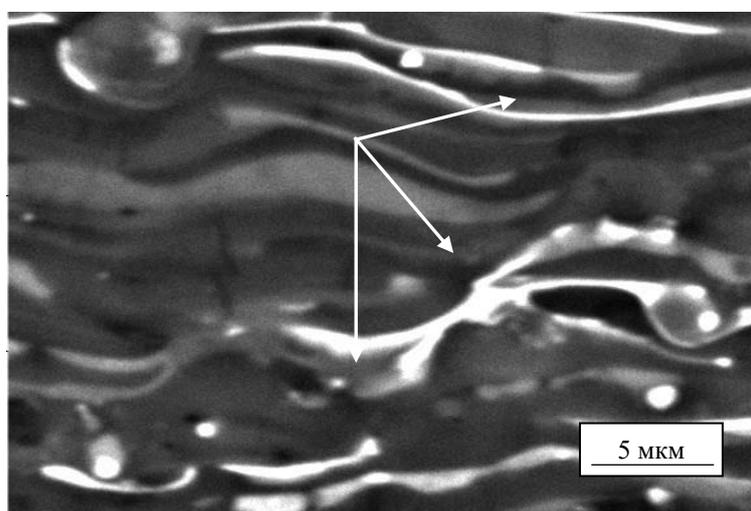


Рис. 5. Микроструктура плазменного покрытия состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2 + 10\% \text{Ni}$

Плазменное напыление разработанного металлокерамического порошка композиции $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$ сопровождается рядом превращений, основными из которых являются образование сложного соединения $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, а также полиморфное превращение низкотемпературной модификации $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в высокотемпературную модификацию $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, количество которой в слое достигает 70 %. Содержание $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – около 15 %, $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ – 10 %. Также присутствует никель в количестве около 5 %. Наличие диоксида титана рентгеноструктурный анализ не выявил (рис. 6).

Машиностроение

Плазменное напыление приводит к увеличению плотности дислокаций в формируемых покрытиях до $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с синтезированным порошком, в котором значение данного параметра составляет $1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (для $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Степенное распределение деформаций по объему зерна свидетельствует об упорядоченном расположении дислокаций. Область когерентного рассеивания в плазменном покрытии уменьшается, по сравнению с исходным порошком, с 24 до 14 нм.

Полученные слои подвергали испытанию на изгиб. Результаты показав-

ли, что газотермические покрытия из металлокерамических порошков имеют более высокую прочность сцепления с подложкой и вязкость. Так, покрытия из неметаллизированного порошка, нане-

сенные на образец с толщиной стенки менее 0,25 мм, при деформации хрупко разрушаются с отделением покрытия от подложки.

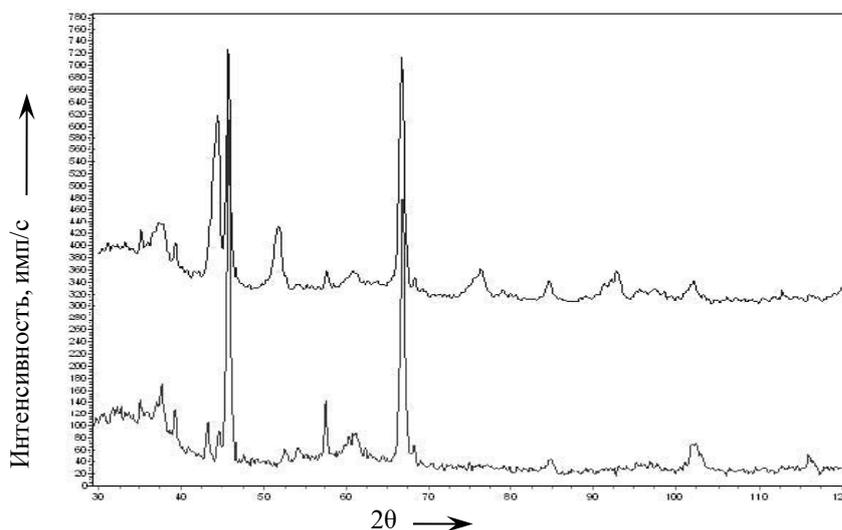


Рис. 6. Рентгенограммы плазменных покрытий, сформированных из порошков составов $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2$, изготовленных способом механического легирования

Деформация покрытия, имеющего аналогичные геометрические параметры и полученного из механически легированного металлокерамического порошка, также сопровождается разрушением. При этом полного отслоения от основы не происходит, а образуется ряд трещин в области деформации. Начало растрескивания начинается при большем значении угла деформации. К примеру, плазменное покрытие, полученное напылением керамического порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$, сохраняет целостность при изгибе на угол $(4 \pm 0,5)^\circ$. В то же время в покрытии, в состав которого дополнительно ввели 10 % Ni, первые признаки разрушения проявляются при деформации на угол $(9 \pm 1)^\circ$. При этом стоит отметить, что с увеличением содержания металла в композиции наименьшее значение угла изгиба, при котором фиксируется начало разрушения слоя, увеличивается.

Для установления зависимости

влияния Ni и Al на свойства плазменных покрытий из металлокерамических порошков был реализован полнофакторный эксперимент. Переменным фактором являлось содержание в композиции никеля и алюминия, количество которых в шихте варьировалось в интервалах 7,5 %...12,5 % и 3,75 %...6,25 % соответственно. Время обработки в механореакторе – 8 ч. Нанесение покрытия осуществлялось на режимах работы плазмотрона, указанных ранее.

Относительная вязкость металлокерамических слоев оценивалась по углу деформации покрытия с подложкой. В качестве эталона был выбран образец с покрытием из порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2$, полученного конгломерированием.

В результате проведения экспериментов и обработки полученных данных была установлена следующая зависимость относительной вязкости плазменных металлокерамических покрытий от

содержания металлических компонентов: $\mu_{\text{отн}} = 1,52 - 0,118x_{12} - 0,117x_{11}^2$.

Графическая интерпретация модели представлена на рис. 7.

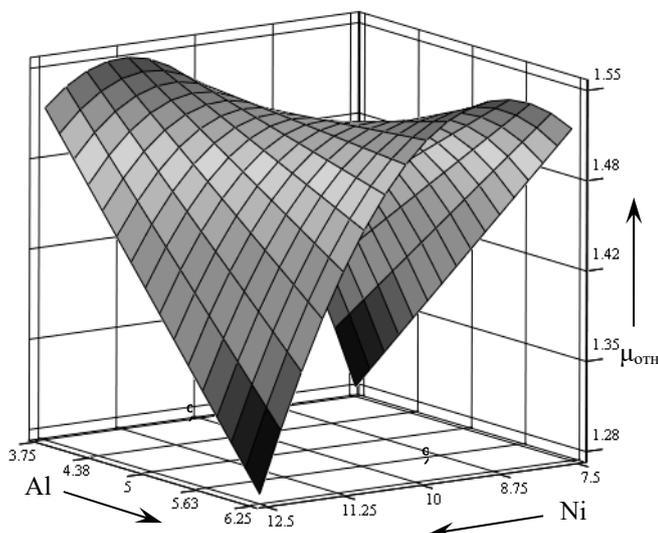


Рис. 7. Изменение вязкости покрытий из порошков на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - \text{Ni} - \text{Al}$ в зависимости от количества алюминия и никеля в исходной шихте

Согласно полученной графической модели, наибольшей вязкостью обладают покрытия с максимальным содержанием одного из вводимых металлов при минимальном содержании второго. Подобное поведение можно объяснить тем, что при наибольшей разнице в содержании двух металлов образуется минимальное количество хрупких интерметаллидов, способных увеличить износостойкость, но снижающих вязкость слоя.

Таким образом, механосинтез керамических порошков на основе оксидной керамики позволяет получить покрытия, отличающиеся повышенной вязкостью и меньшей склонностью к образованию трещин. Введение в состав исходной композиции порошков никеля и/или алюминия способствует росту вязкости до 2 раз. Это позволяет значительно повысить стойкость покрытий к трещинообразованию, включая случаи отклонения режимов напыления от оптимальных значений. Полученные покрытия отличаются сложным неравно-

весным фазовым составом, основу которого составляет высокотемпературная фаза $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Дополнительная подготовка порошка перед напылением

Применение мелкодисперсных керамических порошков связано с рядом технологических трудностей. Основными из них являются низкая сыпучесть и склонность к комкованию, что способствует зависанию их в бункере питателя, налипанию на стенки воздушно-порошкового тракта, неравномерной подаче в плазменную струю. В связи с этим есть потребность в совершенствовании технологического процесса напыления.

Использование синтезированных порошков на основе оксидной керамики, в сочетании с усовершенствованием технологии их напыления, не только обеспечит возможность формирования покрытий с высокой стойкостью против тепловых и механических ударов, но

также позволит существенно увеличить эффективность процесса напыления и снизить потребление электроэнергии.

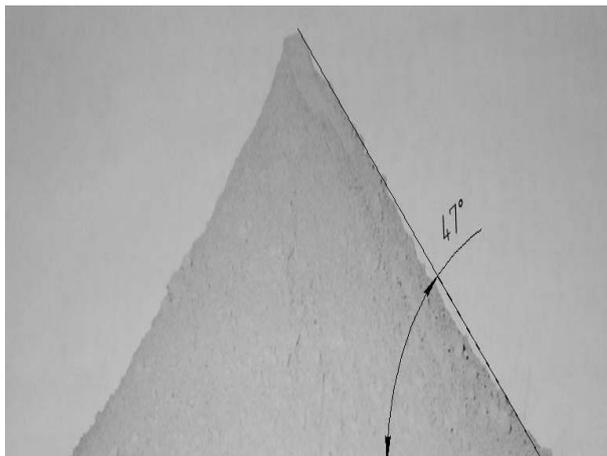
Для порошков с низкой сыпучестью, к которым относится большинство керамических материалов для газотермических способов напыления, текучесть можно определить по углу естественного откоса, образуемому между горизонтальной плоскостью и касательной к профилю конуса свободно насыпанного порошка. Увеличение угла естественного откоса соответствует снижению сыпучести материала [4, 5].

В процессе исследований было установлено, что керамические материалы с размером частиц до 63 мкм в исходном состоянии при температуре 20 °С

и нормальной влажности образуют угол естественного откоса более 45° (рис. 8, а), что однозначно свидетельствует об их низкой сыпучести.

С целью усовершенствования технологии напыления был разработан специальный способ подготовки порошков, позволивший существенно повысить их текучесть. Он включает этапы смешивания порошка со связующим, сушку полученной массы, измельчение высушенного брикета и отсев требуемой фракции. Перед использованием полученный порошок просушивается в печи и загружается в бункер питателя в нагретом состоянии. В процессе напыления температура порошка поддерживается на постоянном уровне.

а)



б)

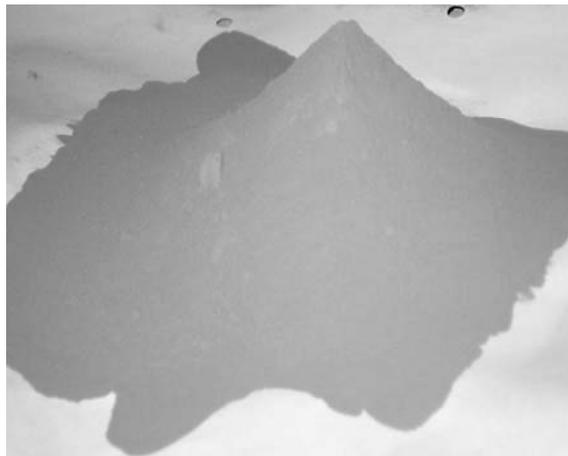


Рис. 8. Предварительно подогретый до 20 °С (а) и 160 °С (б) механически легированный металлокерамический свободно насыпанный порошок

Порошок, подготовленный по разработанной технологии и подогретый до температуры выше 150 °С, приобретает свойства свободно текучего материала (рис. 8, б). Это позволяет увеличить стабильность процесса напыления и его производительность, а также снизить пористость формируемых покрытий.

Выводы

1. Процесс обработки в механоректоре исходной шихты состава

Машиностроение

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{Ni}$ сопровождается формированием гомогенного порошкового материала, а также фазовыми и структурными превращениями, результатом которых является образование новых фаз, значительное увеличение плотности дислокаций, а также их упорядочение, что подтверждается уменьшением области когерентного рассеивания и увеличением параметров кристаллической решетки основы.

2. Плазменное напыление синтезированных металлокерамических порош-

ков на основе композиции 78 % Al_2O_3 – 13 % TiO_2 – 10 % Ni сопровождается превращениями, активирующимися в процессе нанесения покрытия и заключающимися в переходе низкотемпературной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) в высокотемпературную ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), а также ее стабилизацией благодаря быстрому охлаждению на подложке; появлением сложного химического соединения $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$.

3. В результате плазменного напыления плотность дислокаций в основной фазе (Al_2O_3) увеличивается в формируемых покрытиях до величины $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с синтезированным порошком, в котором значение данного параметра составляет $1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Область когерентного рассеивания в плазменном покрытии уменьшается с 24 до 14 нм.

4. Структура плазменных покрытий, полученных из разработанных металлокерамических порошков, характеризуется присутствием в слое тончайших

включений никеля, упрочненных ультрадисперсными частицами $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, оксидов титана и алюминия. Никелевые включения располагаются по границам зерен оксидов, при этом их толщина менее $1 \cdot 10^{-3}$ мм. Наличие включений никеля способствует эффективной релаксации внутренних напряжений, что значительно снижает вероятность образования трещин в покрытии и их отслоение от подложки.

5. Для разработанных механически легированных металлокерамических порошков, состоящих из частиц осколочной формы с величиной основной фракции не более 5 мкм, разработана специальная технология подготовки порошка перед напылением, которая позволяет улучшить сыпучесть материала, а также увеличить производительность процесса, снизить расход электроэнергии, уменьшить пористость покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.: ил.
2. **Эсибян, Э. М.** Энергетические и технологические особенности воздушно-газового плазменного напыления / Э. М. Эсибян, А. Г. Саков // Автоматическая сварка. – 1989. – № 10. – С. 28–32.
3. **Кудинов, В. В.** Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. – Москва: Наука, 1977. – 184 с.
4. **Кудинов, В. В.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 192 с.

Статья сдана в редакцию 13 июня 2024 года

Контакты:

5trannik@tut.by (Федосенко Алексей Сергеевич);
lovshenko2014@yandex.ru (Ловшенко Федор Григорьевич);
belyakovich.2012@mail.ru (Белякович Виктор Александрович);
Paal10319@gmail.com (Андреев Илья Константинович);
capsloock3333@mail.ru (Оленцевич Алексей Сергеевич).

**A. S. FEDOSENKO, F. G. LOVSHENKO, V. A. BELYAKOVICH, I. K. ANDREYEV,
A. S. OLIENTSEVICH**

**METAL-CERAMIC POWDERS PRODUCED BY MECHANICAL ALLOYING
AND PLASMA COATINGS MADE OF THEM**

Abstract

The article presents the results of research aimed at developing composite ceramic-based powders manufactured using the method of mechanical alloying, and the technology of their preparation for high-performance spraying of plasma coatings. The results of studies of powders' characteristics, as well as their phase composition and morphology, are given. The article also considers the results of studying the structure and properties of the coatings.

Keywords:

reactive mechanical alloying, plasma spraying, composite powder, wear resistance, ceramic coatings, metal ceramics.

For citation:

Metal-ceramic powders produced by mechanical alloying and plasma coatings made of them / A. S. Fedosenko, F. G. Lovshenko, V. A. Belyakovich, I. K. Andreyev, A. S. Olientsevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 61–71.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-72-80

УДК 621.791.763.2

С. М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

А. О. СЕРГЕЙЧИК

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

А. Д. МИХАЛЮТО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В ПРОЦЕССЕ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Аннотация

Разработан программный код в среде графического программирования LabVIEW, позволяющий использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода для построения системы адаптивного регулирования мощности рельефной сварки. Задание величины тока подогрева осуществляется с учетом коэффициента подогрева, зависящего от величины усилия сжатия электродов. Переход к нарастанию тока от подогрева к сварке происходит при достижении перемещения электрода при подогреве определенной величины, указывающей на достаточную степень разогрева рельефа. Скорость нарастания тока регулируется коэффициентом датчика скорости, который зависит от скорости перемещения электрода. Выключение сварочного тока происходит при достижении величины деформации рельефа 80 %...90 % от его начальной высоты, в связи с чем повышается эффективность проковки соединения.

Ключевые слова:

контактная точечная и рельефная сварка, программные средства регулирования, система адаптивного регулирования, перемещение подвижного электрода, графическое программирование, виртуальный регулятор цикла сварки.

Для цитирования:

Разработка программных средств системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, А. О. Сергейчик, С. В. Болотов, А. Д. Михалюто // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 72–80.

Введение

Изучение и разработка однопараметрических микропроцессорных систем контроля и управления процессом контактной точечной и рельефной сварки представляет значительный интерес для промышленности. Разрабатываемые системы управления сосредотачиваются на контроле напряжения между электродами сварочной машины, динамического сопротивления зоны соединения или перемещения подвижного электрода.

Системы, основанные на измерении напряжения или динамического сопротивления, имеют обширный опыт

использования в промышленности [1–4], в то время как системы, основанные на управлении процессом сварки по перемещению электрода, пока мало используются из-за более сложного алгоритма управления и недостаточного опыта исследований в данной области.

Параметр управления, связанный с перемещением подвижного электрода во время сварки, непосредственно указывает на качество сварного соединения. Однако создание эффективного алгоритма управления на основе этого параметра требует более сложного подхода, чем у других методов контроля. Системный подход к разработке алгоритма управления контактной точечной свар-

кой, основанный на перемещении электрода, предлагает новые перспективы в области контроля сварочных процессов. Использование метода конечных элементов для моделирования процесса сварки и определения физики процесса позволяет более глубоко понять и оптимизировать данную систему управления [1, 5–7].

Разработка эталонных характеристик перемещения электрода с использованием компьютерного моделирования позволяет контролировать как выплеск расплавленного металла шва, так и шунтирование тока при сварке.

Такой подход к контролю контактной точечной и рельефной сварки, основанный на использовании микропроцессорных программных средств для построения систем адаптивного регулирования мощности на основе задания эталонных характеристик перемещения и временных циклограмм, открывает новые возможности для обеспечения стабильного качества сварных соединений непосредственно в процессе сварки, предотвращения возможных дефектов сварных конструкций и по-

вышения эффективности их производства [5–10].

Основная часть

Работа виртуального регулятора цикла сварки контактной сварочной машины реализована при помощи программного кода в среде графического программирования LabView. Структура программы содержит ряд последовательно обрабатываемых блоков.

После запуска программы система находится в режиме ожидания до нажатия на педаль SB1 сварочной машины. При этом перед запуском машины в подготовительном (нулевом) блоке происходит обнуление датчика перемещения подвижного электрода, а также формирование цифрового сигнала «Включение питания клапанов» (рис. 1, а). Цифровой выход P0.3 подключает питание электропневмоклапанов с помощью реле напряжения KV1 и подготавливает их к работе (рис. 1, б). Этим исключается включение клапанов при отключенной от сети плате сбора данных.

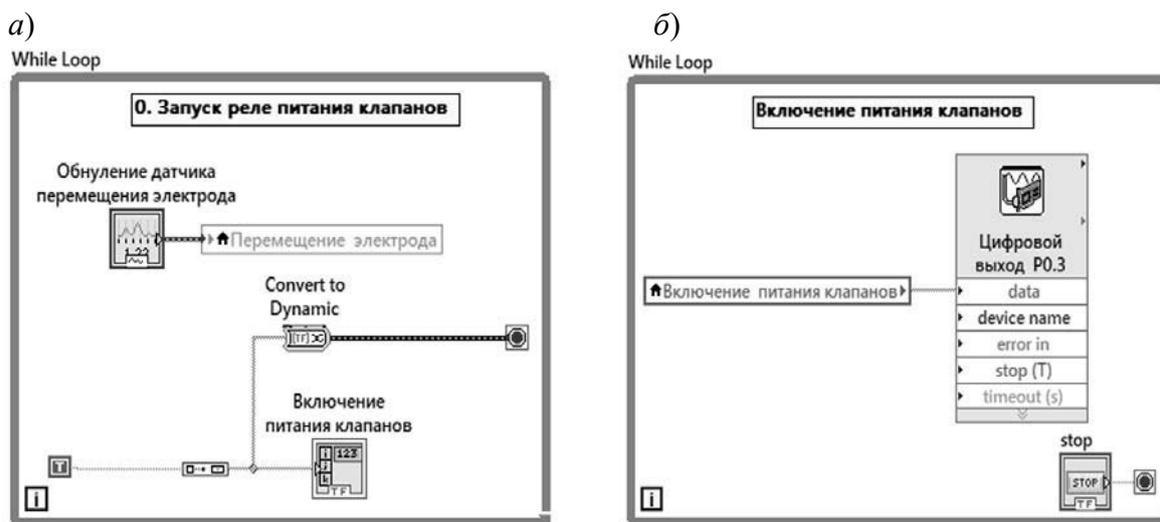


Рис. 1. Подключение питания клапанов и обнуление датчика перемещения

В первом блоке программы осуществляется контроль нажатия педали SB1 запуска машины контактной

сварки. После нажатия педали происходит запуск циклограммы процесса контактной рельефной сварки с помощью

триггера PFI 0 (цифровой вход P1.0) (рис. 2, а). Задание цифровых сигналов управления осуществляется с помощью формирователя массива Build Array.

За включение питания катушек клапанов Y1 (Кл.1) малого усилия сжатия электродов при сварке и Y2 (Кл.2) большого усилия при проковке отвечают цифровые выходы платы сбора данных P0.1 и P0.2 соответственно (рис. 2, б). Цифровые триггеры PFI 1/P1.1 и PFI 2/P1.2 отвечают соответственно за «Измерение перемещения электрода»

и «Включение тока». Цифровые индикаторы PFI 5/P1.5, PFI 6/P1.6 и PFI 7/P1.7 сигнализируют соответственно о протекании тока подогрева $I_{под}$, нарастании тока от подогрева к сварке и протекании сварочного тока $I_{св}$ [5, 11, 12].

Второй блок задает время предварительного сжатия электродов сварочной машины. После срабатывания клапана малого усилия сжатия Кл.1 (цифровой выход P0.1) таймер Elapsed Time отсчитывает время предварительного сжатия (рис. 3, а).

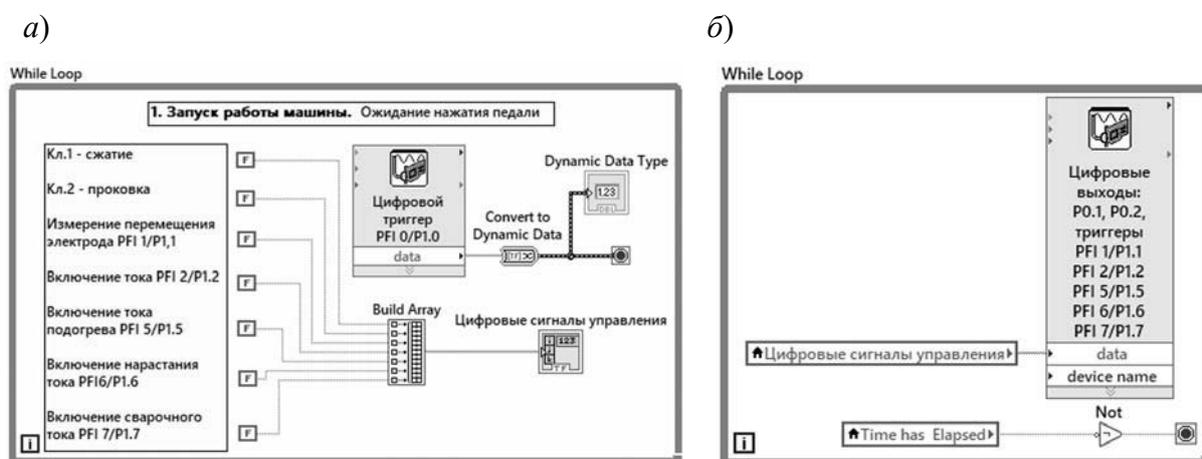


Рис. 2. Запуск работы машины и задание цифровых сигналов управления

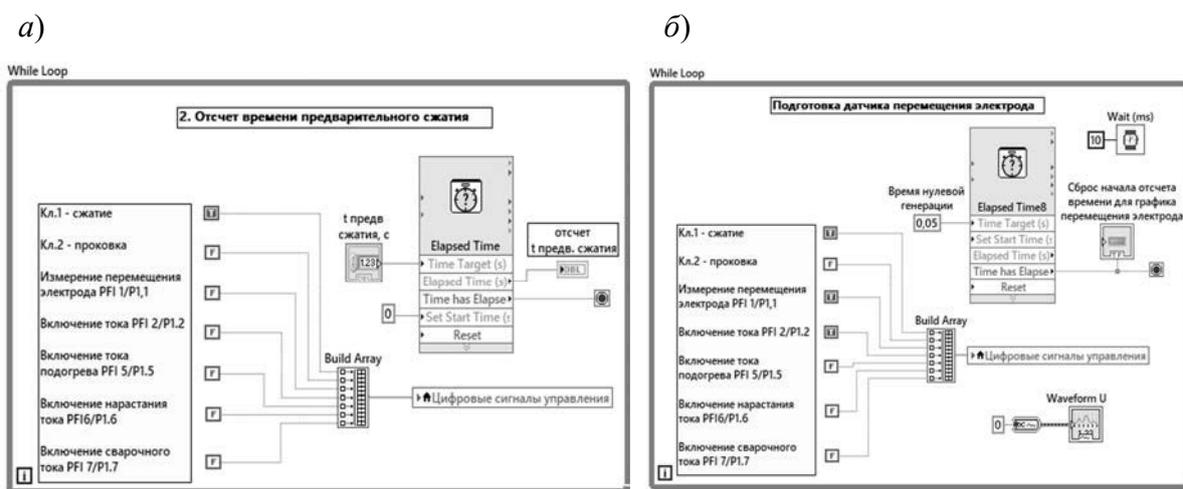


Рис. 3. Задание и отсчет времени предварительного сжатия электродов (а) и подготовка датчика перемещения электрода к измерению сигнала (б)

Далее происходит подготовка датчика перемещения электрода к измерению сигнала (рис. 3, б). Для этого после включения триггера PFI 1/P1.1 «Измерение перемещения электрода» происходит сброс начала отсчета времени для графика перемещения электрода с задержкой цикла на 10 мс с помощью блока Wait (ms).

Срабатывание триггера PFI 2/P1.2 «Включение тока» запускает генерацию сигнала напряжения управления U_y тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М. Сигнал формируется в виде осцилло-

граммы Waveform U. Для учета аппаратной задержки начала регистрации сигнала U_y задается время нулевой генерации в течение 0,05 с.

Третий блок отвечает за отсчет времени протекания тока подогрева $I_{под}$ с помощью таймера Elapsed Time6 (рис. 4). При этом срабатывает индикатор «Включение тока подогрева» (цифровой триггер PFI 5/P1.5). Задание тока подогрева $I_{под}$ осуществляется с учетом коэффициента подогрева $K_{под}$, зависящего от величины усилия сжатия электродов $F_{св}$.

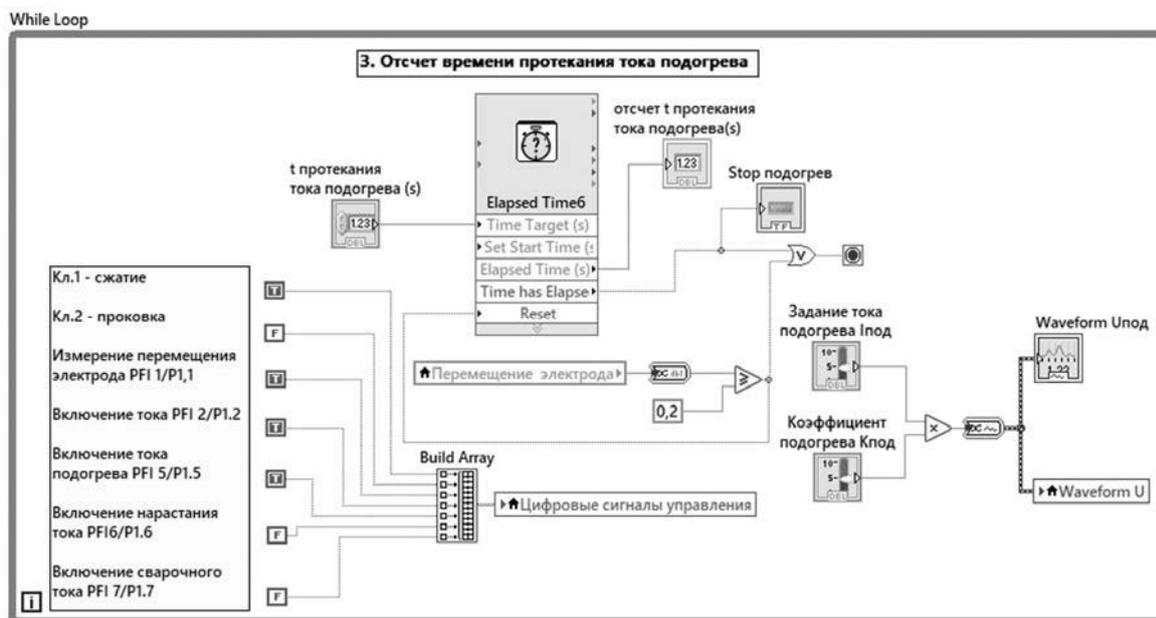


Рис. 4. Задание и отсчет времени протекания тока подогрева

Вначале задается максимально допустимое время подогрева. Окончание цикла подогрева происходит при достижении величины перемещения электрода определенной величины (примерно 0,2 мм), что указывает на достаточную степень разогрева рельефа и возможность нарастания тока до сварочного. Если за допустимое время подогрева величина перемещения не достигла заданной величины, срабатывает сигнал «Stop подогрев», ток выключается и цикл завершается с выводом сообщения «Недостаточный ток подогрева». В ре-

зультате работы блока формируется сигнал напряжения управления при подогреве в виде осциллограммы Waveform U_{под} параллельно с общим сигналом управления U_y – осциллограмма Waveform U.

В четвертом блоке осуществляется задание и отсчет времени нарастания тока от подогрева к сварке. При этом срабатывает индикатор «Включение нарастания тока» (цифровой триггер PFI 6/P1.6) (рис. 5). Контролируемой величиной здесь является скорость нарастания тока, которая регулируется

коэффициентом датчика скорости $K_{дс}$, зависящим, в свою очередь, от скорости перемещения электрода.

Если в предыдущем блоке сработал сигнал «Stop подогрев», то с помощью блока выбора Case Structure во вкладке True происходит обнуление ос-

циллограммы Waveform U – сигнала управления U_y , иначе обнуление сигнала не происходит.

Переход к выполнению следующего блока происходит при достижении заданного значения сварочного тока $I_{св}$.

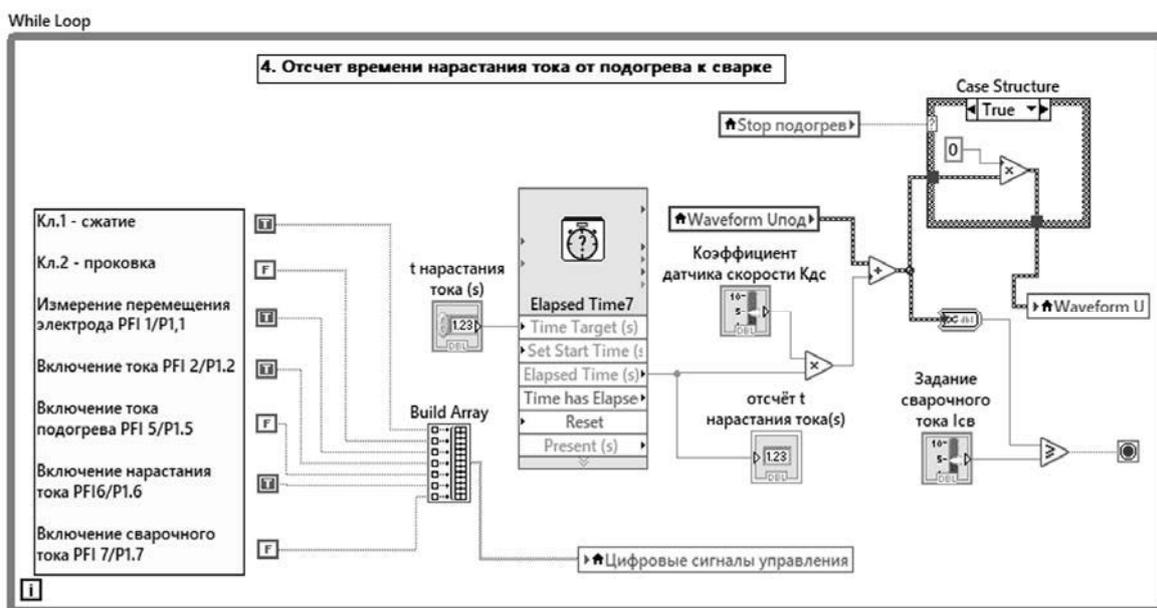


Рис. 5. Задание и отсчет времени нарастания тока от подогрева к сварке

Время протекания сварочного тока $I_{св}$ разделяется на два этапа. При этом срабатывает индикатор «Включение сварочного тока» (цифровой триггер PFI 7/P1.7).

В пятом блоке производится отсчет начала включения повышенного усилия проковки от момента включения сварочного тока (рис. 6) для учета инерционности пневмопривода. Максимальное усилие проковки должно быть достигнуто не позднее, чем через 0,18...0,2 с после выключения тока для эффективного уменьшения растягивающих остаточных напряжений и повышения механических свойств получаемых сварных соединений.

В шестом блоке производится отсчет общего времени протекания сварочного тока $t_{св}$, которое должно быть задано на 0,18...0,2 с больше, чем время

начала включения повышенного усилия проковки $F_{ков}$ (рис. 7). Клапан большого усилия Кл.2 включается с помощью цифрового выхода P0.2 (см. рис. 2, б). Выключение сварочного тока $I_{св}$ происходит при достижении величины деформации рельефа 90 % от его начальной высоты h_p . Этим исключается шунтирование сварочного тока по околошовной зоне при полной деформации рельефа и повышается эффективность проковки соединения. После завершения цикла срабатывает сигнал «Стоп перемещение» с задержкой цикла на 10 мс с помощью блока Wait (ms), который останавливает регистрацию перемещения электрода.

Далее последовательно выполняются блоки отсчета времени проковки сварного соединения усилием $F_{ков}$ без тока (рис. 8, а) и времени паузы между

сварками (рис. 8, б). После отключения тока происходит обнуление осциллограммы Waveform U – сигнала управления U_y .

После завершения всего цикла сварки подачей нулевого сигнала на цифровой выход P0.3 отключается питание электропневмоклапанов (рис. 9).



Рис. 6. Задание и отсчет времени начала включения повышенного усилия проковки от момента включения сварочного тока

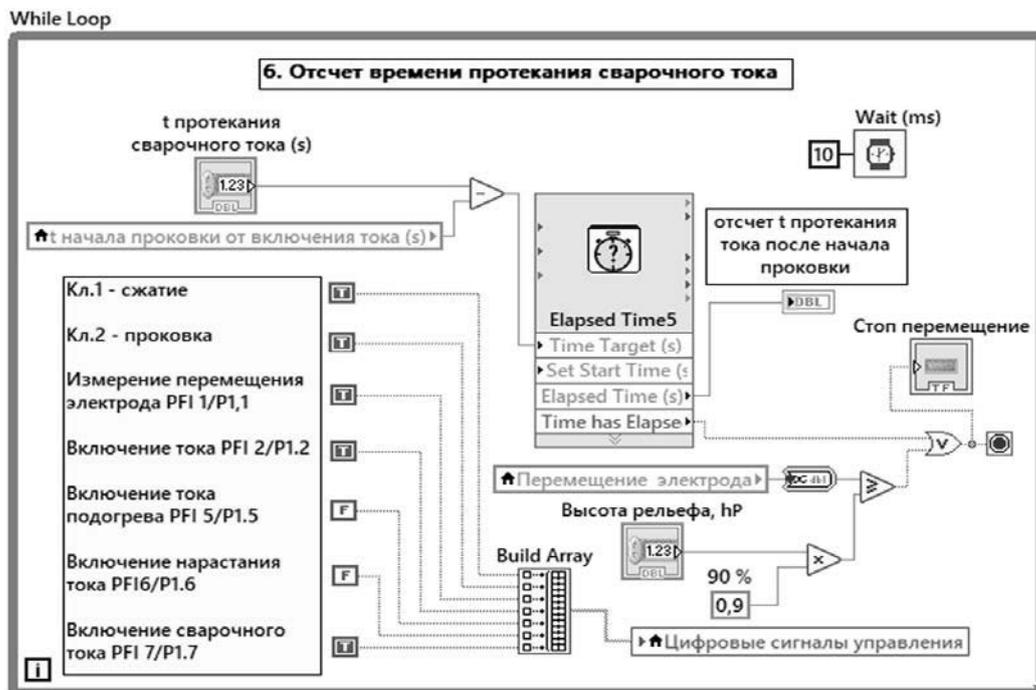


Рис. 7. Задание и отсчет общего времени протекания сварочного тока

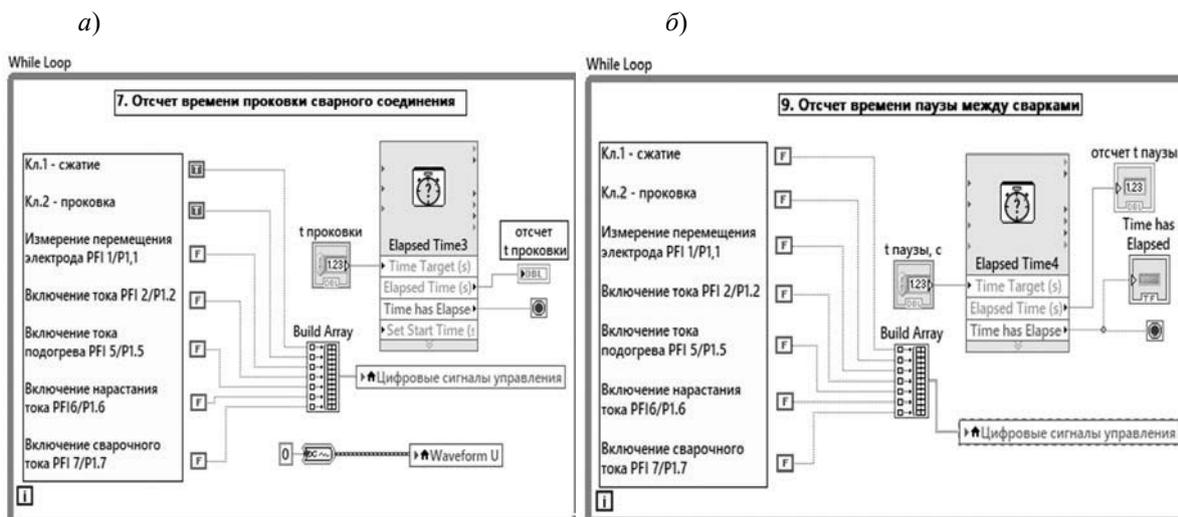


Рис. 8. Задание и отсчет времени проковки (а) и паузы между сварками (б)

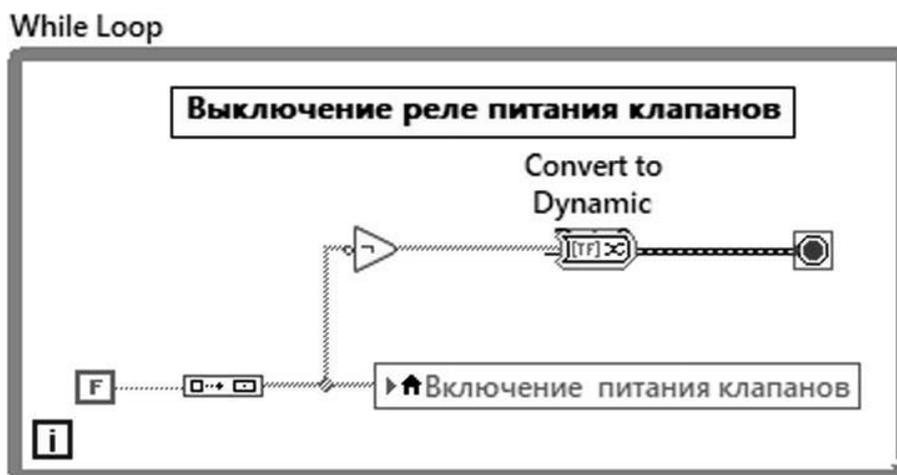


Рис. 9. Отключение питания электропневмоклапанов

Локальная переменная Time has Elapsed используется для сброса таймеров в паузе между сварками. Логический сигнал Time has Elapsed сбрасывается в нулевое значение FALSE при завершении девятого блока (см. рис. 8, б), при этом формирование цифровых выходов останавливается, т. к. через инвертор Not срабатывает условие завершения цикла (см. рис. 2, б). После отсчета паузы сигнал Time has Elapsed снова устанавливается в высокое состояние TRUE и разрешает работу цикла формирования цифровых выходов,

при этом таймеры начинают отсчет сначала.

Таким образом, разработанный виртуальный регулятор контактной сварки на базе графического программирования в среде LabView позволяет использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода для построения системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки, что открывает возможности стабилизации качества сварных соединений без прерывания процесса сварки.

Выводы

1. Разработан программный код в среде графического программирования LabVIEW, позволяющий использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода контактной сварочной машины для построения системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки.

2. Задание величины тока подогрева $I_{под}$ осуществляется с учетом коэффициента подогрева $K_{под}$, зависящего от величины усилия сжатия электродов $F_{св}$, при этом переход к нарастанию тока от подогрева к сварке происходит при достижении перемещения электрода при подогреве определенной величины (около 0,2 мм), что указывает на до-

статочную степень разогрева рельефа, в обратном случае процесс сварки останавливается.

3. Скорость нарастания тока регулируется коэффициентом датчика скорости $K_{дс}$, который зависит от скорости перемещения электрода, при этом переход к следующему блоку происходит при достижении заданного значения сварочного тока $I_{св}$.

4. Выключение сварочного тока $I_{св}$ происходит при достижении величины деформации рельефа 80 %...90 % от его начальной высоты h_p , в связи с чем исключается полная деформация рельефа, шунтирование сварочного тока по околосшовной зоне и повышается эффективность проковки соединения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhang, H.** Resistance welding. Fundamentals and Applications / H. Zhang, J. Senkara. – New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 446 p.
2. **Kas, Z.** An Electrothermal Model Based Adaptive Control of Resistance Spot Welding Process / Z. Kas, M. Das // Intelligent Control and Automation. – 2015. – Vol. 6, № 2. – P. 134–146.
3. **Kas, Z.** Adaptive Control of Resistance Spot Welding Based on a Dynamic Resistance Model / Z. Kas, M. Das // Mathematical and Computational Applications. – 2019. – № 24 (4): 86–99. – P. 1–14.
4. Effect of Initial (Reference) Welding Current for Adaptive Control and It's Optimization to Secure Proper Weld Properties in Resistance Spot Welding / Md. Ashaduzzaman [et al.] // Journal of Welding and Joining. – 2015. – Vol. 33, № 6. – P. 507–514.
5. **Фурманов, С. М.** Пути совершенствования термомеханических циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 274 с.
6. Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding / C. L. Tsai [et al.] // Welding Research Supplement. – 1991. – № 12. – P. 339–351.
7. **Cho, Y.** Advanced Resistance Spot Welding Technologies: New Machine, Adaptive Control and FEM Simulation / Y. Cho, I. Chang, H. Lee // Materials Science Forum. – 2008. – Vol. 580–582. – P. 367–370.
8. **Psarommatis, F.** Implementation of Zero Defect Manufacturing using quality prediction: a spot welding case study from Bosch / F. Psarommatis, B. Zhou, E. Kharlamov // Procedia Computer Science: 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing. – 2024. – № 232. – P. 1299–1308.
9. **Yu, J.** Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels / J. Yu // Metals. – 2018. – № 8 (10), 775. – P. 1–20.
10. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
11. Разработка программного кода адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке / С. М. Фурманов [и др.] // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 нояб. 2022 г. – Могилев, 2022. – С. 215–220.
12. Графическое программирование системы адаптивного управления процессом рельефной сварки в среде LabVIEW / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 107–117.

Статья сдана в редакцию 31 мая 2024 года

Контакты:

rochta_furm@mail.ru (Фурманов Сергей Михайлович);
oitsp.dmitriy.u@gmail.com (Юманов Дмитрий Николаевич);
sergei4ix@gmail.com (Сергейчик Антон Олегович);
s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
antonbackra@gmail.com (Михалюто Антон Денисович).

**S. M. FURMANOV, D. N. YUMANOV, A. O. SERGEYCHIK, S. V. BOLOTOV,
A. D. MIKHALYUTO**

**DEVELOPMENT OF ADAPTIVE POWER CONTROL SOFTWARE IN PROJECTION
WELDING PROCESS**

Abstract

A program code has been developed in the LabVIEW graphical programming environment, which makes it possible to use the reference characteristics of the displacement of a movable electrode to build a system for adaptive power control in projection welding. Setting the value of the heating current is carried out taking into account the heating coefficient, which depends on the magnitude of the compressive force of electrodes. The transition to an increase in current from heating to welding occurs when the electrode displacement during heating reaches a certain value, indicating a sufficient degree of heating the projection. The rate of current rise is controlled by the speed sensor coefficient, which depends on the speed of the electrode movement. The welding current is switched off when the projection deformation reaches 80 %...90 % of its initial height, which increases the efficiency of forging the joint.

Keywords:

resistance spot and projection welding, software control tools, adaptive control system, movable electrode displacement, graphic programming, virtual welding cycle controller.

For citation:

Development of adaptive power control software in projection welding process / S. M. Furmanov, D. N. Yumanov, A. O. Sergeychik, S. V. Bolotov, A. D. Mikhalyuto // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 72–80.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-81-90

УДК 621.787

А. Н. ЮМАНОВА**В. М. ШЕМЕНКОВ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА РАЗЛИЧНОЙ ЧАСТОТЫ ГОРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ УПРОЧНЯЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ**Аннотация**

Рассмотрена возможность формирования высоковольтных частотных импульсов с возможностью регулирования тока в пределах от 50 до 150 кГц. Представлена схема формирования устройства, позволяющего получить более широкие возможности регулирования частоты. Представлены результаты, позволяющие получить представление о влиянии частоты течения тока высоковольтного тлеющего разряда на глубину модифицированного слоя при помощи имитационного моделирования.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, модифицирование, поверхностный слой, упрочнение, имитационное моделирование, частота горения, скин-эффект, активный слой.

Для цитирования:

Юманова, А. Н. Имитационное моделирование воздействия тлеющего разряда различной частоты горения на поверхностный слой упрочняемых изделий / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков / Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 81–90.

Введение

Как известно, тлеющий разряд относится к одному из видов газового разряда, представляющий собой сочетание сложных физических явлений, таких как электрический пробой газа, формирование проводящего канала и прохождением через него электрического тока и формирование магнитного поля вокруг электродного пространства.

Одним из определяющих параметров тлеющего разряда является частота его горения. Как было установлено ранее, частота горения тлеющего разряда в значительной степени влияет на глубину упрочненного слоя [1].

В отличие от классической обработки, где частота разряда является величиной неуправляемой и, как правило, случайной, авторами предложен способ упрочнения изделий из металлов и сплавов, заключающийся в обеспечении управления частотной характеристикой тока тлеющего разряда в пределах

от 1 до 150 кГц [2].

Требуемая частота горения разряда, зависящая от основных электрофизических параметров обрабатываемого материала упрочняемого изделия, определялась [3] в соответствии с формулой

$$\nu = \frac{\rho}{\delta^2 \pi \mu \mu_0}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала изделия, Ом·м; δ – глубина модифицированного слоя, м; μ – магнитная проницаемость материала изделия. К примеру, для стали $\mu \approx 100$ при индуктивности магнитного поля не более 0,002 Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Н·А⁻²; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Для реализации предлагаемого способа используется вакуумная камера с расположенными в ней анодом и катодом, подключенными к специализированному блоку, который обеспечивает горение тлеющего разряда с требуе-

мой частотой.

Схема установки для осуществле-

ния упрочнения представлена на рис. 1.

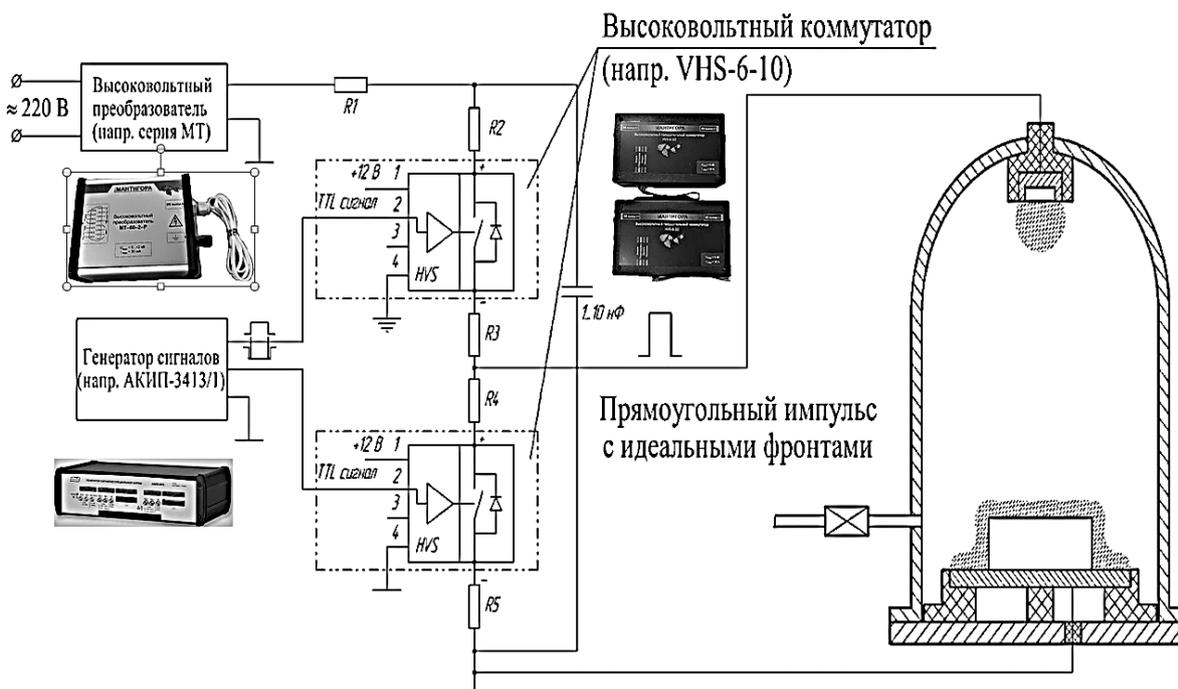


Рис. 1. Схема установки для упрочнения

В качестве генератора частоты принят стандартный серийно выпускаемый генератор TTL-сигнала; в качестве высоковольтного источника питания – источник, состоящий из лабораторного автотрансформатора, повышающего трансформатора и полупериодного преобразователя, либо высоковольтного преобразователя DC-DC.

На генераторе сигналов (АКИП-3413/1) задается частота горения разряда (от 1 до 150 кГц). Гальванически изолированный управляющий драйвер от входных полюсов подключается к высоковольтному коммутатору к плавающим потенциалам в полумостовой схеме. Сигнал подается на высоковольтный твердотельный коммутатор серии VHS-6-10, разработанный по технологии последовательного подключения полевых транзисторов, после чего попадает на усилитель и драйвер для подключения транзистора, который ком-

мутирует высоковольтную цепь. Твердотельный коммутатор серии VHS-6-10 включается и подается коммутируемый ток (можно коммутировать напряжение как положительной, так и отрицательной полярности).

Зная значения величины удельного сопротивления материала упрочняемого изделия, задаваясь необходимой величиной модифицированного слоя по выражению (1), вычисляют требуемую частоту горения тлеющего разряда, которую генерируют с помощью генератора TTL-сигнала [4].

Как показала практика, полученный при обработке по приведенной выше технологической схеме упрочненный слой несколько отличается от расчетного «активного слоя».

Если, например, обратить внимание на результаты дюрметрического анализа образца из стали 20, прошедшего упрочнение при различных частотах

горения разряда (рис. 2), можно увидеть, что упрочненный слой имеет переходную зону, характеризующуюся монотонным уменьшением твердости

по глубине до значений, соответствующих твердости основного материала изделия [5, 6].

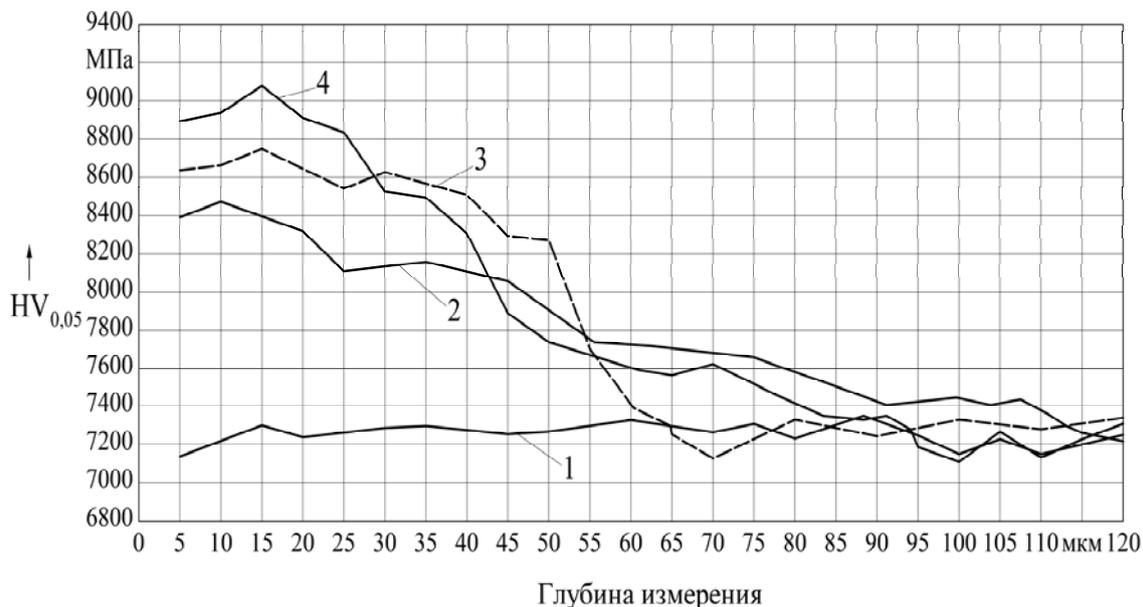


Рис. 2. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали 20: 1 – до обработки; 2 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 50 кГц; 3 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 100 кГц; 4 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 150 кГц

Если преобразовать выражение (1) и подставить необходимые значения, то получим, что глубина «активного слоя» для стали 20 при обработке тлеющим разрядом с частотой горения 50 кГц составит 90 мкм, при частоте горения 100 кГц – 65 мкм, а при частоте 150 кГц – 55 мкм. При сопоставлении полученных расчетных данных с рис. 2 можно видеть, что выражение (1) выражает полную глубину слоя, полученного на основании возникающего в процессе упрочнения скин-эффекта, и, как правило, не в полной мере отражает реальной картины, т. к. она не учитывает так называемой переходной зоны, в которой твердость снижается от значений, соответствующих упрочненной зоне, до твердости, соответствующей твердости основного материала [7].

Таким образом, опираться только на представленную зависимость при описании процесса формирования

упрочненного слоя является не совсем точным.

Параметрическое моделирование, позволяющее в полной мере получить полную картину упрочнения импульсным разрядом, связано с рядом трудностей. Прежде всего, это большое количество параметров, которые необходимо учитывать при создании аналитической системы. Геометрия разряда, ток и напряжение, давление и вакуумная система, газовый состав, условия генерации ионов из разрядного пространства и многие другие параметры необходимо учитывать и регистрировать для получения сильного и стабильного аналитического сигнала. Многие такие процессы экспериментально сложно и трудоёмко исследовать. Ещё одной трудностью является интерпретация полученных эмпирических данных, т. к. обычно измеряемые величины определяются совокупностью нескольких явлений, за-

частую неизвестных и неожиданных, выделить из которых главное не представляется возможным. Всё это делает весьма трудной разработку подобной аналитической системы без её теоретической модели.

На данный момент существует ряд методов, позволяющих моделировать тлеющий разряд постоянного тока и радиочастотный разряд. Однако они не применимы к моделированию процессов в импульсном тлеющем разряде, т. к. принципиально созданы для расчета стационарного режима горения плазмы и не могут моделировать динамические характеристики процессов в импульсном тлеющем разряде. Методов же, позволяющих удовлетворительно моделировать импульсный тлеющий разряд, до сих пор не существовало.

Модели, описывающие процессы в импульсном тлеющем разряде, весьма сложны и поэтому появляется необходимость использования профессиональных пакетов численного моделирования. Одним из таких пакетов является ANSYS, который основан на методе конечных элементов, с помощью которого можно производить все необходимые при моделировании процесса упрочнения вычисления.

Основная часть

Для решения поставленной задачи использовалась среда ANSYS Workbench, где реализована возможность связанного совмещенного анализа термоэлектрических процессов [8]. Решить задачу в других стандартных модулях не представляется возможным, т. к. в них невозможно задать параметры процесса упрочнения, а особенно параметры горения плазмы тлеющего разряда между анодом и катодом. Моделирование процесса осуществлялось по следующему алгоритму.

1. При моделировании электромагнетизма использовался модуль ANSYS Maxwell, который обладает расширенными возможностями для опре-

деления электрических параметров различных процессов.

2. Полученные результаты переданы в модуль для решения нестационарных термических задач – ANSYS Transient Thermal.

3. Параллельное связанное решение задачи для получения более точного результата.

4. Моделирование возникающей электромагнитной индукции и распределения плотности тока в поверхностном слое упрочняемого изделия осуществлялось в модуле ANSYS Electronic Desktop Maxwell.

Образец для моделирования представляет собой объемное тело в виде параллелепипеда с геометрическими размерами $100 \times 100 \times 50$ мм. Данные размеры образца позволяют определить действие обработки тлеющим разрядом как на поверхности изделия, так и на его глубине. В качестве основного материала образца для моделирования задавалась конструкционная сталь 20 и быстрорежущая сталь P18 с физическими, механическими и электромагнитными свойствами, взятыми из расширенной библиотеки материалов ANSYS Granta Materials.

Выбор сталей обусловлен необходимостью проверки теории об одинаковом влиянии тлеющего разряда на разнообразные изделия из различных сталей.

В табл. 1 представлены основные физические свойства используемых сталей.

Размер катода принят равным размеру катода реально существующей вакуумной установки 400×500 мм.

Начальные и граничные условия задавались на основании закрепления образца и элементов имитационной модели в пространстве, а также параметров взаимодействия с окружающей вакуумной средой исследуемой области.

Передача энергии от анода к катоду в условиях низкого вакуума симулировалась путем настройки модуля Мах-

well Eddy Current в категории Boundaries, доступные для редактирования в

ANSYS Electronic Desktop [9, 10].

Табл. 1. Основные физические свойства сталей при температуре 20 °С

Сталь	Удельное электрическое сопротивление $\rho_s, 10^8 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Модуль упругости $E, 10^5 \cdot \text{МПа}$	Удельный вес $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Удельная теплоемкость $C, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$
Сталь 20	16,9	44...46	2,13	7859	486
P18	41,9	26...27	2,28	8800	420

Для получения полной картины влияния частоты горения разряда на поверхностный слой обрабатываемой детали необходимо моделирование провести по нескольким частотам. Таким образом, принимаем следующий ряд частот: 25, 50, 100 и 150 кГц.

Кроме того, для полноты картины при моделировании принимаем следующий ряд тока тлеющего разряда: 25, 50, 100 и 150 мА.

При моделировании процесса использовался метод конечных элементов, основанный на аппроксимации непре-

рывной величины, определенной бесконечным числом значений, дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

В работе в качестве конечных элементов применялся трехмерный тетраэдральный конечный элемент, который, как правило, применяется для расчета пространственных тел, имеющих трехосное напряженное состояние (рис. 3).

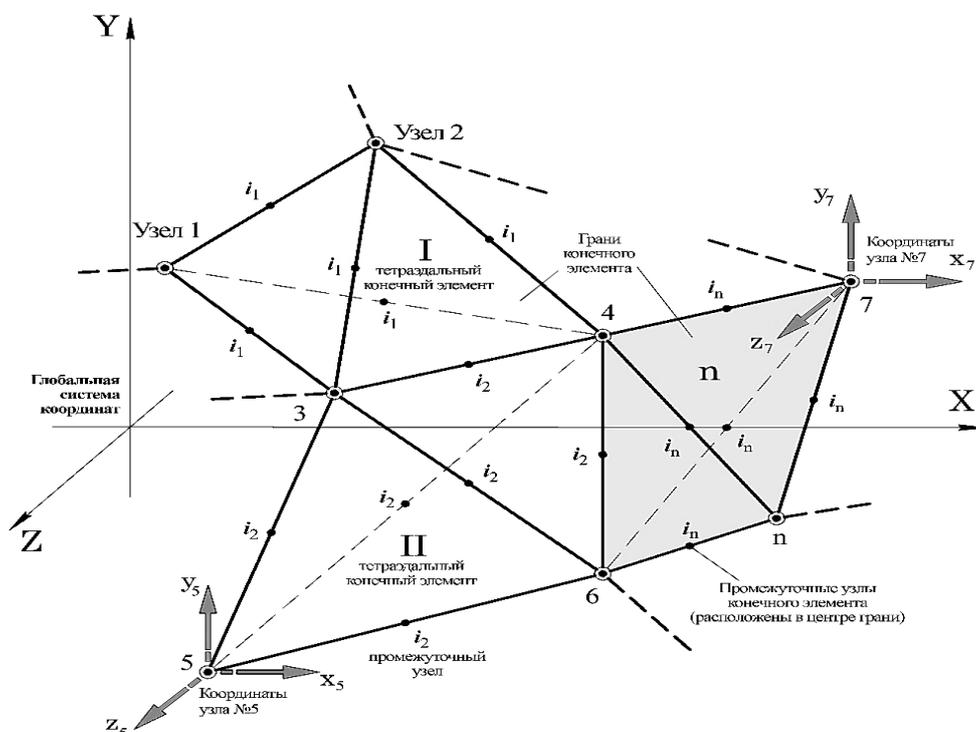


Рис. 3. Конечные элементы, используемые при имитационном моделировании

Данный вид конечных элементов позволяет увеличить количество степеней свободы элемента без увеличения количества его узлов. Применение полного кубического интерполяционного полинома и увеличенного количества степеней свободы позволяет получить высокую точность результатов.

Сетка конечных элементов имела различную размерность для каждого из элементов модели. Это связано с тем, что использование слишком малых значений размера конечных элементов

приводит к существенному увеличению времени расчета, поэтому минимальный размер в 1 мм задавался только в образце для упрочнения. Важным параметром настройки сетки образца являлся учет возникновения скин-эффекта, который позволяет автоматически менять программе размер конечных элементов вблизи поверхностей. В этом случае точность разбиения одного элемента повышается в 5 раз, т. е. финальный размер может быть 0,2 мм (рис. 4).

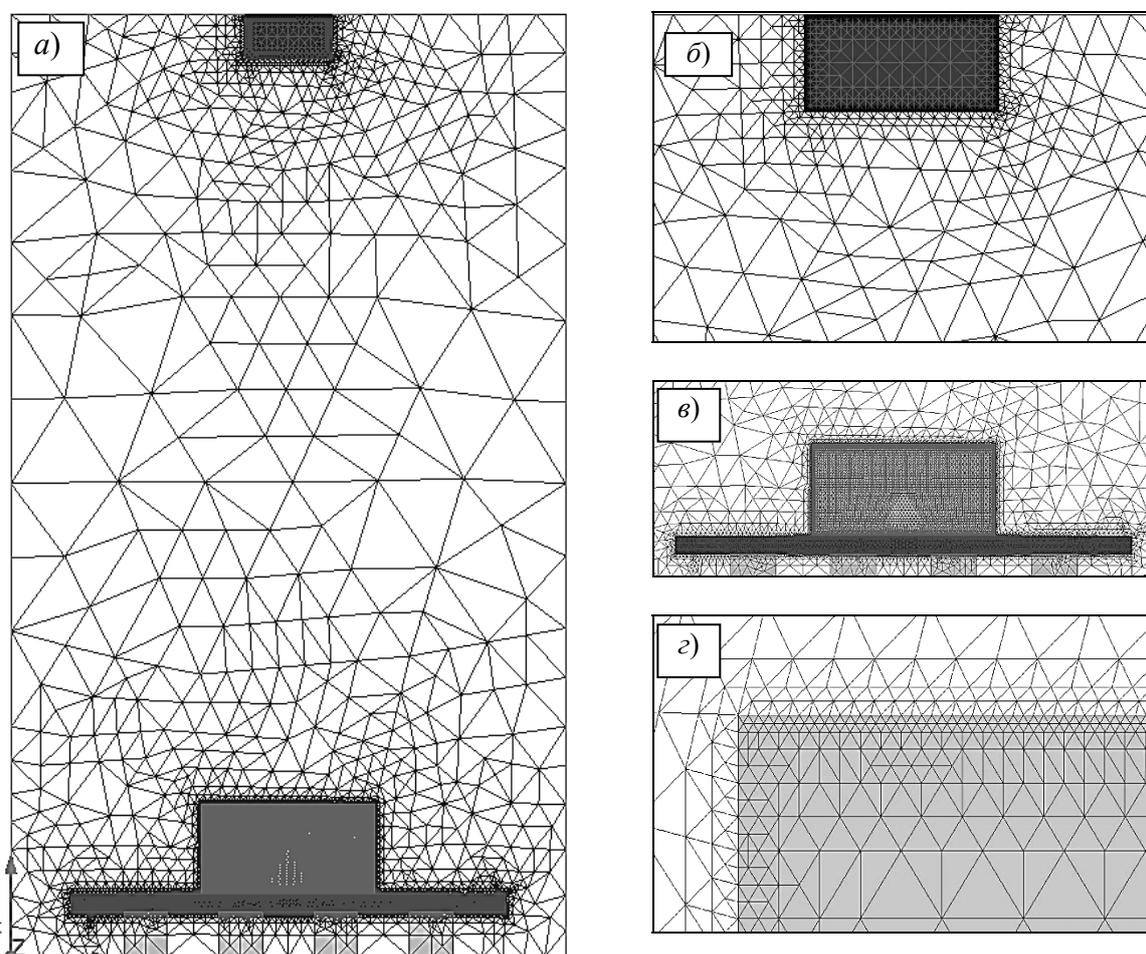


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса обработки импульсным тлеющим разрядом: а – полная картина сетки конечных элементов процесса обработки; б – фрагмент сетки конечных элементов анода; в – фрагмент сетки конечных элементов стола-катода и детали; г – фрагмент сетки конечных элементов поверхности детали

Результаты моделирования

В результате моделирования процесса воздействия тлеющего разряда

различной частоты горения на поверхностный слой установлено, что плотность тока J , A/m^2 , текущего в поверхностном слое упрочняемого изделия,

является неоднородной. Как видно из представленных результатов моделирования (рис. 5–12), несмотря на материал упрочняемого изделия поверхностный «активный» слой можно разделить на два основных участка. Первый участок характеризуется постоянной плотностью

тока по глубине (глубина «активного воздействия»), а второй участок отличается наличием градиентного уменьшения плотности тока. Имеется также и третий участок, не входящий в «активный» слой, характеризующийся отсутствием течения тока.

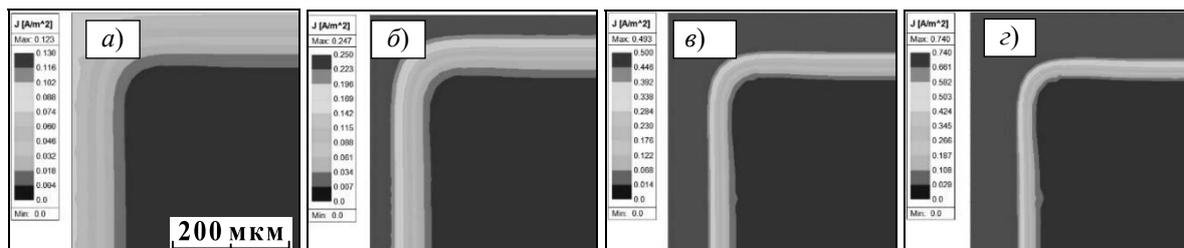


Рис. 5. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 25 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

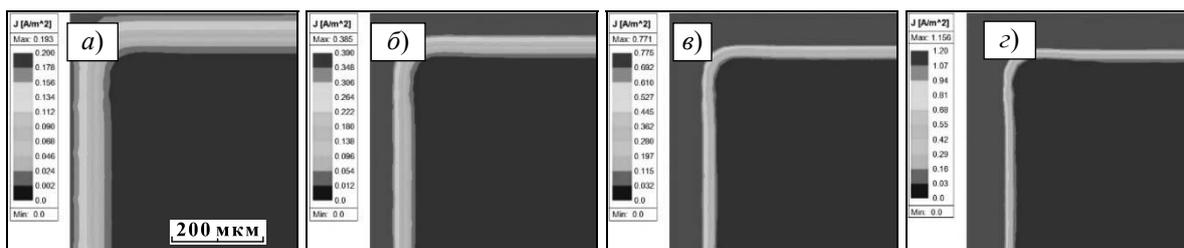


Рис. 6. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 50 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

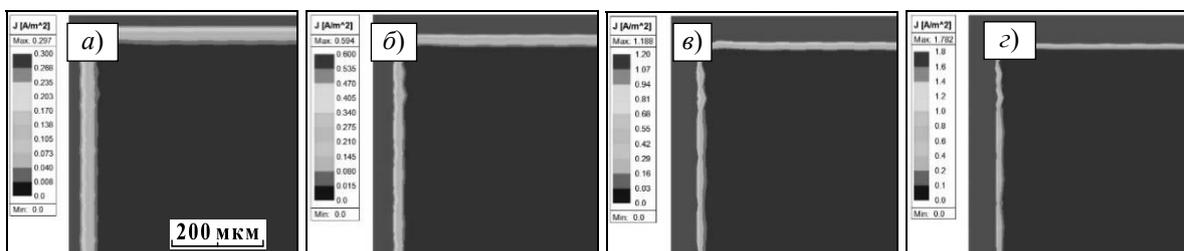


Рис. 7. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 75 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

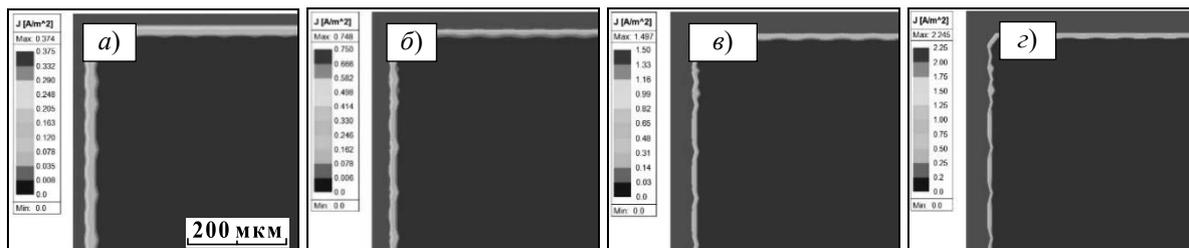


Рис. 8. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 150 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

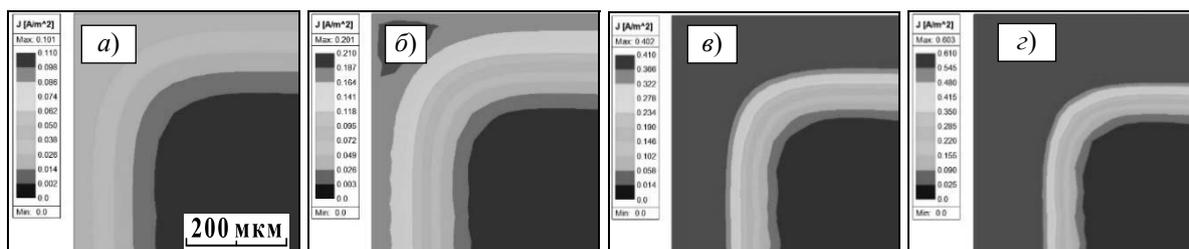


Рис. 9. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 25 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

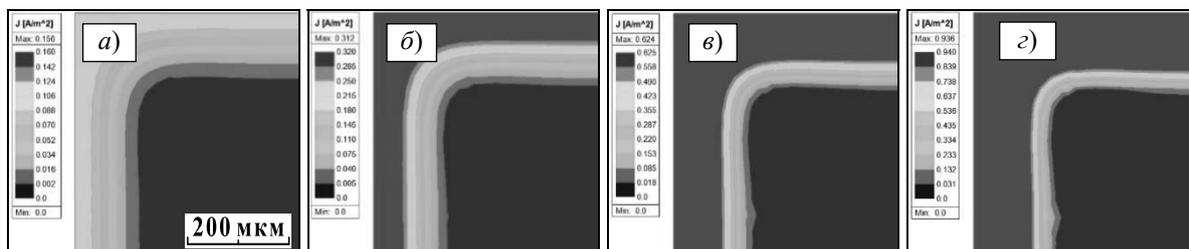


Рис. 10. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 50 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

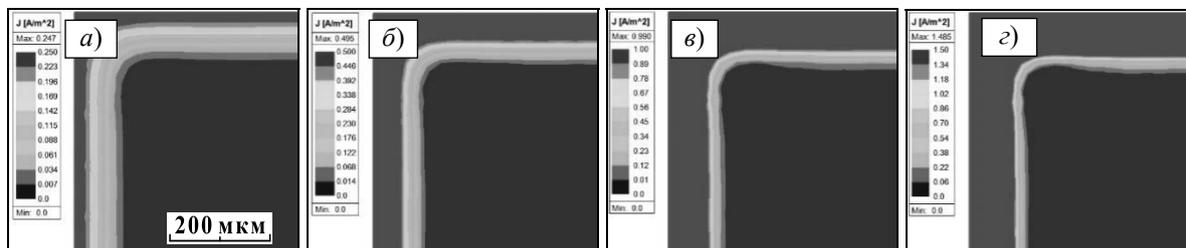


Рис. 11. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 100 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

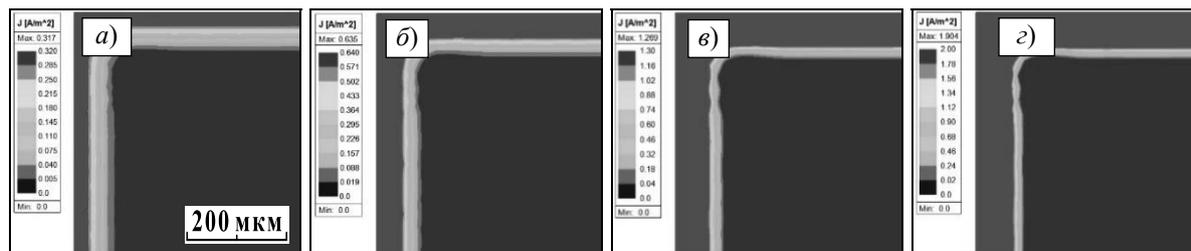


Рис. 12. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 150 кГц: *a* – с силой тока 25 мА; *б* – с силой тока 50 мА; *в* – с силой тока 100 мА; *г* – с силой тока 150 мА

Как видно, частота и сила тока оказывает существенное влияние на картину распределения плотности тока по глубине. С ростом силы тока величина второго участка уменьшается в пользу первого. Кроме этого, рост частоты тока дополнительно приводит к уменьшению «активного» слоя.

На основании совместного анализа результатов дюриметрического исследования поверхностного слоя (см. рис. 2) и моделирования воздействия тлеющего разряда различной частоты горения на поверхностный слой стали 20 (см. рис. 5–8) можно заметить, что они идентичны. Таким образом, можно сделать предположение, что плотность тока, текущего в поверхностном слое, в процессе упрочнения тлеющим разрядом напрямую оказывает влияние на изменение его твердости.

Выводы

Плотность тока, текущего в поверхностном слое изделия при упрочне-

нии, напрямую зависит от частоты тлеющего разряда.

Материал изделия не влияет на картину распределения плотности тока по глубине поверхностного тока, которая выражается в наличии двух основных участков, характеризующихся постоянной плотностью тока по глубине и градиентного уменьшения плотности тока.

Сила тока тлеющего разряда оказывает существенное влияние на изменение баланса между участками. С ростом силы тока величина участка градиентного уменьшения плотности тока уменьшается в пользу участка с постоянной плотностью тока.

Тенденции изменения твердости и плотности тока по глубине поверхностного слоя идентичны, что дает право утверждать о том, что величина плотности тока, текущего в поверхностном слое, в процессе упрочнения тлеющим разрядом напрямую оказывает влияние на изменение его твердости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шеменков, В. М.** Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.
2. Способ упрочнения изделия из металла или сплава: пат. ВУ 24296 / В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко. – Оpubл. 20.06.2024.
3. **Шеменков, В. М.** Структурно-фазовое преобразование материалов тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, И. И. Маковецкий // Вестн. Объед. ин-та высоких температур. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 12–18.
4. **Елисеева, А. Н.** Особенности формирования модифицирования поверхностных слоев на детали из сталей импульсным тлеющим разрядом / А. Н. Елисеева, В. М. Шеменков // Высокие технологии в

машиностроении: материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – С. 218–220.

5. Юманова, А. Н. Формирование упрочненных поверхностных слоев у изделий из сталей импульсным тлеющим разрядом [Электронный ресурс] / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // Инновац. технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 156–158.

6. Елисеева, А. Н. Установление влияния частоты горения импульсного тлеющего разряда на глубину структурно-фазовых превращений в быстрорежущих сталях / А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию ИМИ–ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарapul, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 137–139.

7. Юманова, А. Н. К вопросу определения глубины модифицированного слоя, формируемого обработкой импульсным тлеющим разрядом / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // 56-я Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. – Витебск: гос. технол. ун-т, 2023. – С. 246–247.

8. ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide: руководство по моделированию контакта ANSYS механика // Ansys inc. – Канонсберг, 2017. – Вып. 18.2. – 257 с.

9. Nakasone, Y. Engineering Analysis with ANSYS Software / Y. Nakasone, S. Yoshimoto, T. A. Stolar-ski. – Elsevier, 2006. – 456 p.

10. Yongyi, Zhu. Best Practices for Contact Modeling using ANSYS [Electronic resource] / Zhu Yongyi. – Mode of access: <https://pic.huodongjia.com/ganhuodocs/2017-09-15/1505456086.9.pdf>. – Data of access: 10.05.2024.

Статья сдана в редакцию 14 июня 2024 года

Контакты:

www.anuta994@mail.ru (Юманова Анна Николаевна);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович).

H. M. YUMANOVA, V. M. SHEMENKOV

SIMULATION MODELING OF THE IMPACT OF A PULSED GLOW DISCHARGE ON THE SURFACE LAYER OF STENGTHENED PRODUCTS

Abstract

The possibility of forming high-voltage frequency pulses which makes current regulation in the range from 50 to 150 kHz possible is considered. A diagram of formation of the device to provide wider possibilities for frequency control is given. The results are presented, which allow getting an idea how the frequency of current flow of a high-voltage glow discharge effects the depth of the modified layer using simulation modeling.

Keywords:

glow discharge, modification, surface layer, strengthening, simulation modeling, combustion frequency, skin effect, active layer.

For citation:

Yumanova, H. M. Simulation modeling of the impact of a pulsed glow discharge on the surface layer of stengthened products / H. M. Yumanova, V. M. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 81–90.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-91-100

УДК 620.179.14

В. Г. ПАНТЮШИНА

В. А. НОВИКОВ, д-р техн. наук, проф.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО НА ОСТАЮЩЕЙСЯ ПОДКЛАДКЕ

Аннотация

Экспериментально исследованы особенности формирования тангенциальной составляющей напряженности магнитостатического поля в зоне стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, при намагничивании сварного шва в процессе магнитографического контроля. В ходе экспериментов учитывали толщину свариваемых деталей и размеры подкладки. Даны рекомендации по выбору размеров подкладок.

Ключевые слова:

магнитный контроль, стыковой шов, остающаяся подкладка, параметры подкладки, выпуклость шва.

Для цитирования:

Пантюшина, В. Г. Экспериментальное исследование формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке / В. Г. Пантюшина, В. А. Новиков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 91–100.

Введение

Чтобы обеспечить полное проплавление металла в односторонних стыковых сварных соединениях, используют остающиеся подкладки, которые располагаются в области корня шва. Подкладку изготавливают из того же материала, что и свариваемые детали. Стандарты на разные виды сварки регламентируют только минимальные размеры подкладки [1–4]. Такие соединения выполняют в ресиверах, баллонах, цистернах для транспортировки нефтепродуктов и хранения сжиженного газа, в некоторых элементах резервуаров, реже – в трубах, т. к. выступа-

ющая подкладка уменьшает живое сечение трубы, что увеличивает сопротивление жидкости или газу и приводит к снижению объема прохождения продукта. В подобных объектах подход к подкладке невозможен или затруднен. Наличие концентраторов механических напряжений в зонах перехода шва через зазор между подкладкой и свариваемыми листами может привести к появлению трещин в изделиях, которые подвергаются воздействию динамических нагрузок. Такие дефекты не всегда могут быть уверенно обнаружены применяемыми методами контроля. Кроме того, в соединениях могут быть и традиционные дефекты сварки: поры, шлако-

вые включения, подрезы. Данная работа является одним из этапов исследования возможности обнаружения дефектов в таких соединениях магнитографическим методом. По этой причине экспериментальные исследования формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, являются актуальными.

Основная часть

Для экспериментального исследования формирования магнитостатического поля на поверхности стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, нужно производить измерения напряженности магнитного поля в процессе намагничивания образцов. Применяемые для измерения напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности объекта феррозондовые, магниторезистивные преобразователи, преобразователи Холла и другие не всегда удобны: их трудно расположить соответствующим образом для измерения тангенциальной или нормальной компоненты магнитного поля на криволинейной поверхности. Кроме того, они имеют сравнительно большие размеры и позволяют выполнять измерения на достаточно большом

расстоянии от поверхности объекта. Для измерения напряженности магнитного поля в непосредственной близости от криволинейной поверхности объекта иногда применяют проградуированные ленточные локальные магнитносители (ЛЛМ) [5].

Ленточный локальный магнитноситель представляет собой полоску магнитной ленты шириной 1,5...2 мм. Так как толщина его магнитно-активного слоя, который нанесен на эластичную подложку, составляет от 5 до 25 мкм, то ЛЛМ позволяет приблизиться непосредственно к поверхности объекта и копировать его форму. ЛЛМ содержит небольшое количество ферромагнитного материала и поэтому слабо искажает то поле, которое измеряется. Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля не изменяет своей величины и знака при переходе границы раздела сред, поэтому в первом приближении можно считать, что уложенный на поверхность объекта ЛЛМ позволяет измерять напряженность поля в подповерхностном слое металла.

Предварительно ЛЛМ градуировали в однородном магнитном поле бесконечно длинного соленоида, у которого отношение длины к среднему диаметру обмотки больше десяти (рис. 1).

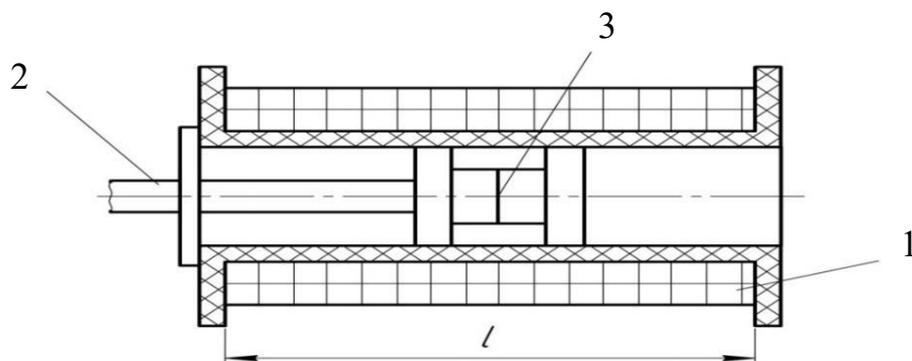


Рис. 1. Намагничивание ленточного локального магнитносителя в соленоиде: 1 – электрическая обмотка; 2 – диэлектрическая цилиндрическая вставка; 3 – ленточный локальный магнитноситель

С этой целью *размагниченный* ЛЛМ закрепляли на диэлектрической цилиндрической вставке, которую с помощью штанги помещали в среднюю часть соленоида. При этом продольная ось соленоида и ось кольца, образованного ЛЛМ, совпадали. На 2...3 с включали ток в электрической обмотке. Затем ЛЛМ извлекали из соленоида и измеряли в направлении поперек ЛЛМ величину, пропорциональную напряженности его остаточного поля. В данном случае определяли размах сигнала на экране магнитографического дефектоскопа при набегании считывающей ин-

дукционной головки на край ЛЛМ. Затем ЛЛМ размагничивали, увеличивали ток в обмотке соленоида до I_2 , а после его отключения снова помещали ЛЛМ в соленоид и производили аналогичные измерения. Для измерения напряженности поля в соленоиде использовали прибор ИМП-1.

Строили график зависимости размаха сигнала, обусловленного остаточной намагниченностью ЛЛМ, от напряженности магнитного поля в соленоиде (градуировочная характеристика ЛЛМ изображена на рис. 2).

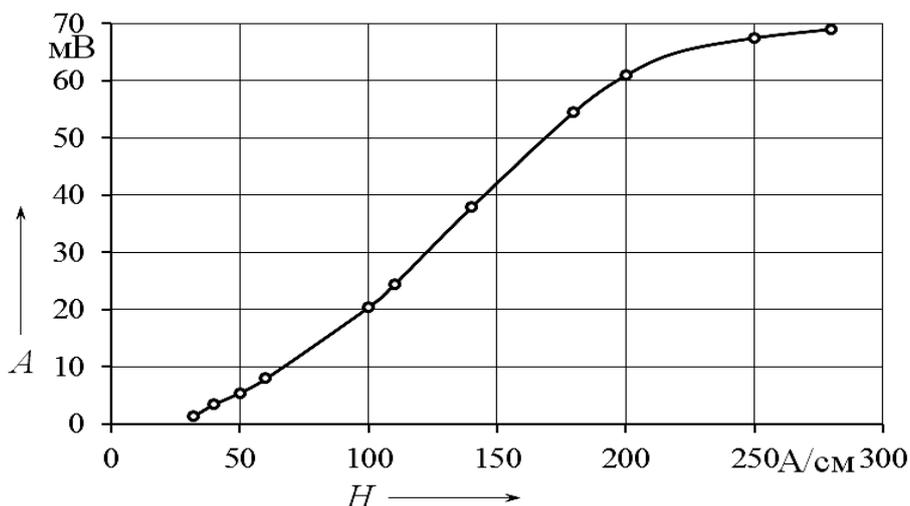


Рис. 2. Градуировочная характеристика размагниченного ленточного локального магнитносителя

Следует отметить, что размагниченный ЛЛМ не позволяет измерять поля напряженностью $H = (0,3...0,4)H_c$, где H_c – его коэрцитивная сила, т. к. в этом диапазоне полей ЛЛМ намагничивается на участке начального (обратимого) намагничивания. То есть остаточная намагниченность ЛЛМ не возникает, т. к. происходит упругое смещение границ между доменами. Для измерения слабых магнитных полей использовали *поляризованный* (предварительно намагниченный до насыщения) ЛЛМ [6].

Приборостроение

Поясним физику процесса записи магнитных полей на ЛЛМ в этом случае. Пусть в результате поляризации ЛЛМ приобрел остаточную намагниченность M_{r1} (рис. 3). Если такой ЛЛМ поместить на штанге внутри соленоида, то при намагничивании его полем, противоположным направлением остаточной намагниченности ($-H_1$), его остаточная намагниченность уменьшается до M_{r2} . Причем чем больше $|-H_1|$, тем меньшую остаточную намагниченность будет иметь поляризованный ЛЛМ

(см. рис. 3). Следовательно, поляризованный ЛЛМ позволяет измерять напряженности слабых магнитных полей.

Методика построения градуировочной кривой в этом случае будет отличаться от вышеописанной тем, что

направление поля в соленоиде при намагничивании ЛЛМ должно быть противоположно направлению его поляризации. Градуировочная характеристика ЛЛМ для измерения слабых магнитных полей представлена на рис. 4.

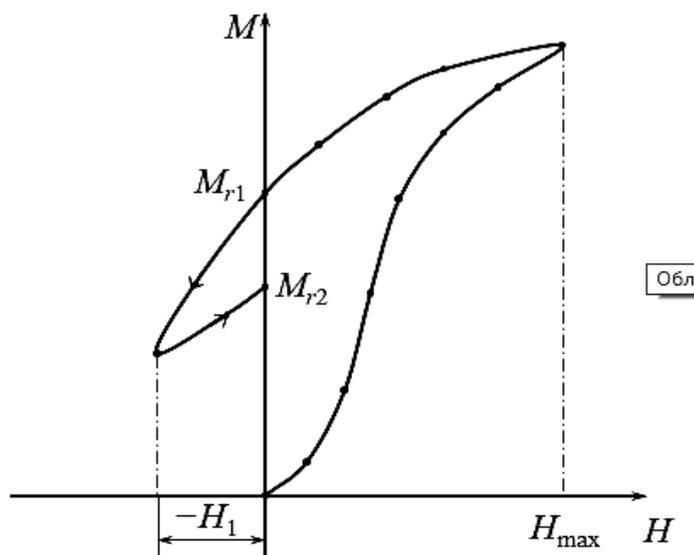


Рис. 3. К пояснению измерения напряженности магнитных полей с помощью поляризованного ЛЛМ

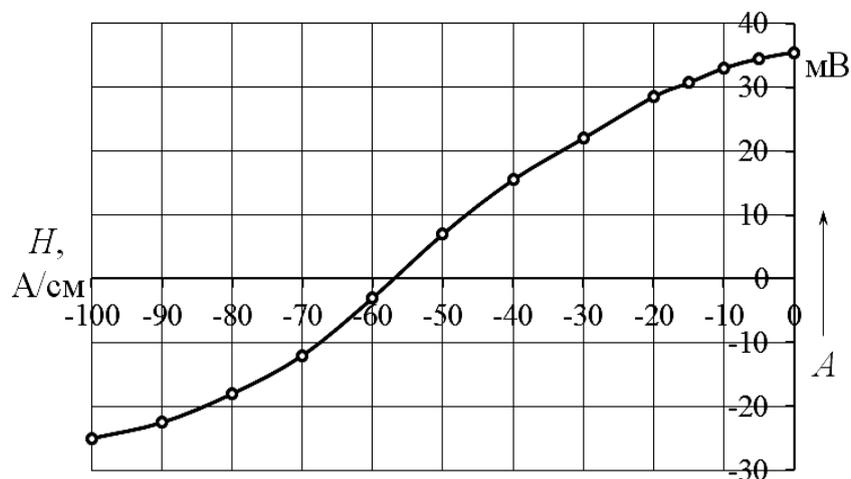


Рис. 4. Градуировочная характеристика поляризованного ленточного локального магнитоносителя

При измерениях напряженности магнитного поля размагниченный ЛЛМ укладывали на исследуемую поверхность объекта и намагничивали вместе с

объектом в направлении поперек ЛЛМ. Затем измеряли размах сигнала при считывании записи с ЛЛМ и по градуировочной кривой (см. рис. 2) определя-

ли напряженность поля. Если измеряли слабые магнитные поля, то ЛЛМ укладывали на объект так, чтобы намагничивающее поле было противоположно направлению поляризации ЛЛМ. В этом случае напряженность поля определяли по градуировочной кривой (см. рис. 4).

Сначала были изготовлены три сварных образца. С этой целью на под-

кладку укладывали две пластины из стали Ст3 размерами $90 \times 80 \times 2$ мм встык с зазором 1 мм между ними и жестко закрепляли. Продольный шов выполняли полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Выпуклость шва удаляли заподлицо с основным металлом (рис. 5).

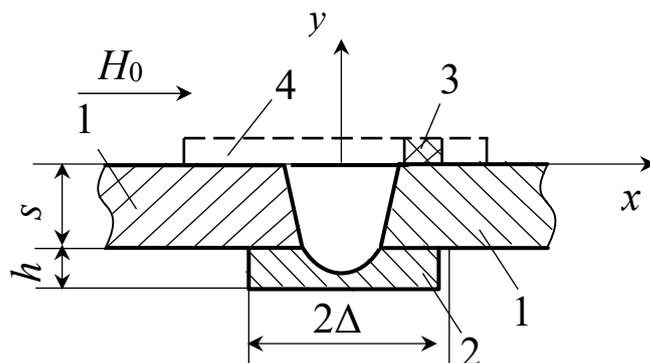


Рис. 5. Сварной образец без выпуклости шва: 1 – свариваемые пластины; 2 – остающаяся подкладка; 3 – ленточный локальный магнитноноситель (ЛЛМ); 4 – места расположения ЛЛМ

Распределение магнитного поля на поверхности образцов определяли с помощью ЛЛМ шириной 1,5 мм, изготовленных из магнитной ленты типа ИЗ701-35 по вышеописанной методике. Подкладки в образцах имели ширину 10 и 15 мм. Образцы намагничивали электромагнитом с П-образным сердечником. Число витков обмотки, выполненной медным проводом диаметром 1,42 мм, – 450. Напряженность внешнего намагничивающего поля при намагничивании образца с уложенным на его поверхность вдоль продольной оси шва ЛЛМ составляла 600 А/см.

Аналогичные эксперименты проводили на несварных образцах, изготовленных из той же стали (рис. 6). В этом случае использовали пластины размерами $180 \times 80 \times 2$ мм, а остающуюся подкладку имитировали плотно прижатой планкой шириной 10 или 15 мм с обратной стороны пластины. На поверхность пластины укладывали ЛЛМ,

затем образец намагничивали. Напряженность поля $H_{тр}$ определяли по градуировочным кривым (см. рис. 2 и 4). Оказалось, что в обоих случаях результаты экспериментов практически одинаковые. Некоторое несовпадение, видимо, можно объяснить затеканием расплавленного металла в пространство между свариваемыми пластинами и подкладкой. Поскольку несварные образцы более просты в изготовлении, то в дальнейшем их использовали при проведении экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 7–9.

На рис. 7 показаны топографии тангенциальной составляющей суперпозиции магнитных полей $H_{тр}$ (внешнего поля и остающейся подкладки) на поверхности образца толщиной 2 мм из стали Ст3 в зависимости от ширины подкладки ($2\Delta = 4; 6; 10; 15; 19; 30$ и 46 мм). Толщина подкладок во всех экспериментах составляла 1 мм.

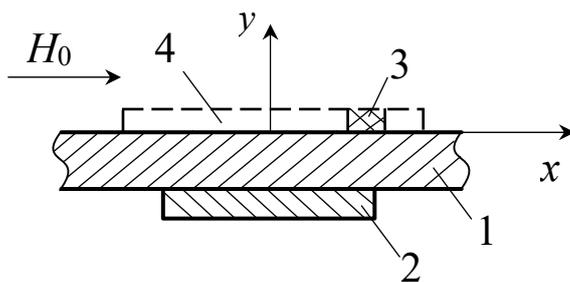


Рис. 6. Вид образцов, применяемых в экспериментах: 1 – стальная пластина; 2 – остающаяся подкладка; 3 – ленточный локальный магнитоситель (ЛЛМ); 4 – места расположения ЛЛМ

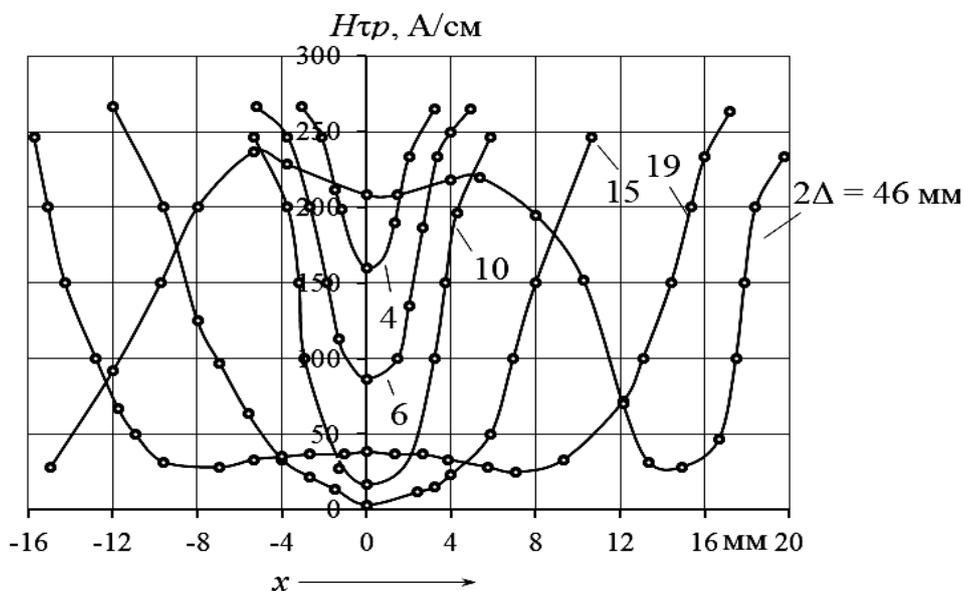


Рис. 7. Топографии тангенциальной составляющей суперпозиции магнитных полей H_{tp} (внешнего поля и остающейся подкладки) на поверхности образца толщиной 2 мм: 2Δ – ширина подкладки

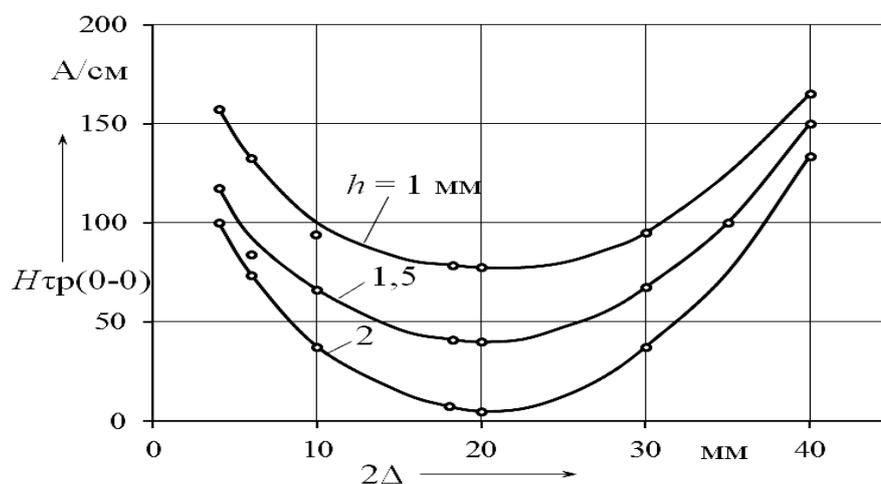


Рис. 8. Графики зависимости напряженности поля $H_{tp}(0-0)$ на поверхности образца толщиной 2 мм в плоскости симметрии подкладки от ширины 2Δ подкладки: h – толщина подкладки

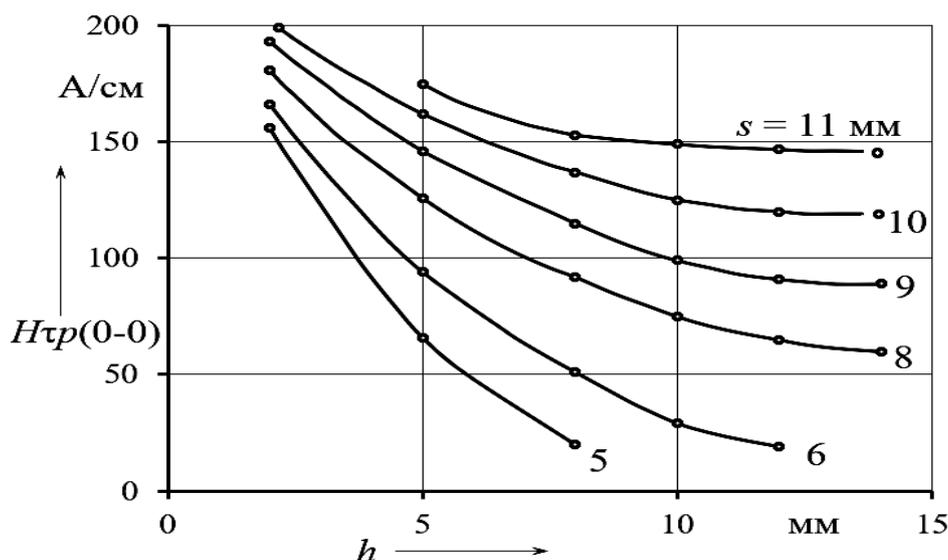


Рис. 9. Графики зависимости напряженности поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца в плоскости симметрии подкладки шириной 15 мм от ее толщины h : s – толщина пластины

Чтобы не загромождать рисунок, кривая для случая $2\Delta = 30$ мм не показана. Из рисунка видно, что с увеличением ширины подкладки от 4 до 15 мм включительно размагничивающее действие подкладки возрастает, $H_{тр}$ имеет вид U-образной кривой, ветви которой направлены вверх. Затем при увеличении 2Δ в диапазоне $19 \leq 2\Delta \leq 46$ мм в плоскости симметрии подкладки появляется максимум, величина которого возрастает. При этом кривая трансформируется из колоколообразной в двугорбую, а вблизи боковых граней подкладки на кривой возникают ярко выраженные минимумы. Последнее можно объяснить тем, что возникающие на боковых гранях подкладки магнитные полюсы оказывают наибольшее размагничивающее действие вблизи этих граней.

На рис. 8 представлены графики зависимости напряженности поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца толщиной 2 мм в плоскости симметрии подкладки от ширины подкладки ($2\Delta = 4; 6; 10; 15; 18; 20, 30$ и 40 мм) для разной ее толщины ($h = 1; 1,5; 2$ мм). Из рисунка видно, что с увеличением ширины подкладки

в диапазоне $4 \leq 2\Delta \leq 20$ мм $H_{тр}(0-0)$ сначала убывает, а затем возрастает, причем чем больше h , тем меньше напряженность результирующего поля в плоскости симметрии образца на его поверхности.

На рис. 9 показаны графики, иллюстрирующие влияние толщины подкладки ($h = 2; 5; 8; 10; 12; 14$ мм) на напряженность результирующего поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца в плоскости симметрии подкладки. Эксперименты выполнены при напряженности намагничивающего поля 600 А/см и ширине подкладки $2\Delta = 15$ мм.

Из рисунка видно, что с увеличением толщины подкладки в диапазоне $2 \leq h \leq 14$ мм напряженность поля в плоскости симметрии образца убывает, причем тем быстрее, чем меньше толщина свариваемых пластин s . При этом чем больше s , тем раньше стабилизируется напряженность результирующего поля $H_{тр}(0-0)$ на поверхности образца. Минимальная напряженность поля наблюдается при толщине свариваемых пластин $s = 2$ мм (на рисунке не показано). Увеличение толщины свариваемых

пластин приводит к резкому увеличению $H_{\tau p}$ (0-0), т. е. условия контроля становятся удовлетворительными.

На рис. 10 изображен сварной образец для проведения экспериментальных исследований топографии магнит-

ного поля на его поверхности. Сварной шов был выполнен автоматической сваркой под слоем флюса. Исследования проводили по вышеописанной методике. Результаты измерений представлены на рис. 11.

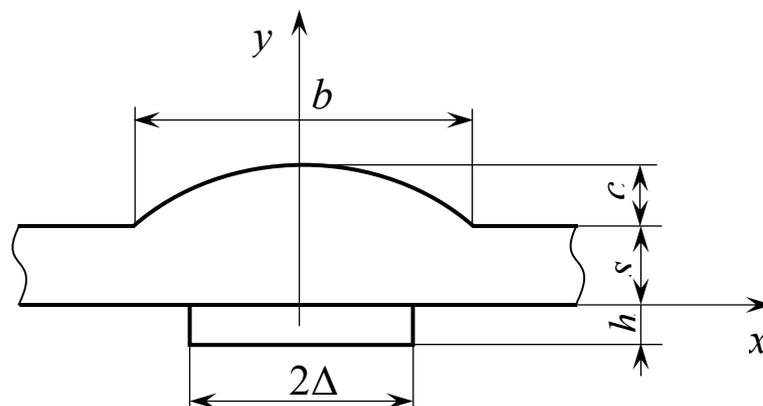


Рис. 10. Сварной образец для экспериментальных исследований: s – толщина свариваемых пластин; c – высота выпуклости шва; b – ширина выпуклости шва; h – толщина подкладки; 2Δ – ширина подкладки

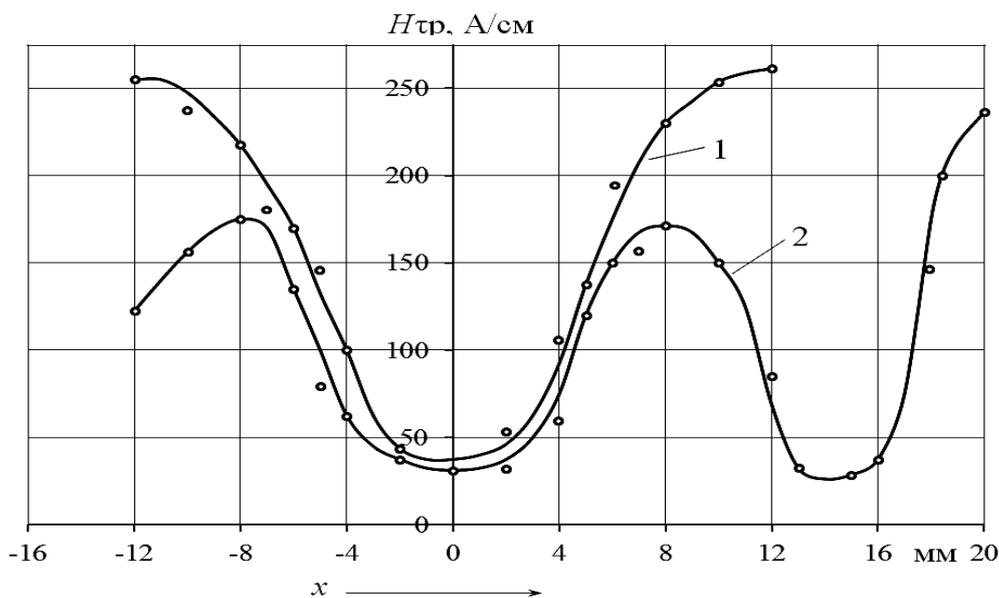


Рис. 11. Топография тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности стыкового сварного соединения: 1 – при отсутствии остающейся подкладки; 2 – при наличии подкладки

На рис. 11 изображены топографии тангенциальной составляющей напряженности результирующего поля на поверхности стыкового сварного соединения с неблагоприятными разме-

рами выпуклости шва и толщин свариваемых пластин: ширина выпуклости $b = 17,6$ мм, высота $c = 2,35$ мм (коэффициент формы выпуклости шва близок к 7). Для сравнения представлены

результаты измерения H_{cp} на поверхности сварного шва пластины толщиной 2 мм из стали Ст3 при отсутствии остающейся подкладки (кривая 1), а также при ее наличии (кривая 2). Напряженность поля, создаваемого электромагнитом, при отсутствии объекта в межполюсном пространстве электромагнита, – 600 А/см. Ширина подкладки для случая, представленного на рисунке, – 46 мм, а ее толщина – 1 мм.

Из рисунка видно, что минимальная напряженность поля наблюдается в плоскости симметрии шва, причем при отсутствии подкладки она составляет около 40 А/см, а при ее наличии – незначительно меньше. Однако если толщина подкладки 1,5...2 мм, то необходимой напряженности магнитного поля на поверхности шва можно достичь только при применении в намагничивающих устройствах концентраторов магнитной индукции. Поэтому остающиеся подкладки таких размеров можно рекомендовать при выполнении соединений для уверенного обнаружения дефектов в них магнитографическим методом. Если ширина подкладки меньше 30 мм, то напряженность поля в плоскости симметрии шва меньше 10 А/см и они на рисунке не приводятся.

Следует отметить, что трещины в таких соединениях располагаются не в плоскости симметрии шва, а в месте перехода шва через зазор между остающейся подкладкой и свариваемыми пластинами, где напряженность результирующего поля значительно больше, чем в плоскости симметрии шва. Если толщина свариваемых пластин больше 2 мм, а коэффициент формы выпуклости шва больше 7, то при использовании концентраторов магнитной индукции можно достичь необходимой напряженности поля в зоне контроля, а следовательно, и чувствительности метода при толщине подкладки до 5...6 мм и минимальной ширине подкладки, регламентируемой стандартом на сварку.

Заключение

Экспериментально исследованы особенности формирования тангенциальной составляющей напряженности магнитостатического поля в зоне стыкового сварного соединения, выполненного на остающейся подкладке, при намагничивании сварного шва в поперечном направлении в процессе магнитографического контроля. В ходе экспериментов учитывали толщину стенки свариваемых деталей и размеры подкладки. Показано, что с увеличением ширины подкладки ее размагничивающее действие возрастает, а затем начинает убывать, причем колоколообразная кривая $H_{cp}(x)$ трансформируется в двугорбую, а вблизи боковых граней подкладки на кривой возникают ярко выраженные минимумы. Последнее обусловлено тем, что возникающие на боковых гранях подкладки магнитные полюсы оказывают наибольшее размагничивающее действие вблизи этих граней. С увеличением ширины подкладки напряженность поля на поверхности образца в плоскости его симметрии сначала убывает, а затем возрастает, причем чем больше толщина подкладки в диапазоне $2 \leq h \leq 14$ мм и меньше толщина свариваемых пластин s , тем меньше напряженность результирующего поля. Чем больше s , тем раньше стабилизируется напряженность результирующего поля на поверхности образца в плоскости его симметрии. Трещины в сварных соединениях, выполненных на остающейся подкладке, располагаются не в плоскости симметрии шва, а в месте перехода шва через зазор между остающейся подкладкой и свариваемыми пластинами, где напряженность результирующего поля при намагничивании соединения значительно больше, чем в плоскости симметрии шва. Даже при неблагоприятных для магнитографической дефектоскопии толщине свариваемых пластин $s = 2$ мм и размерах

выпуклости шва (коэффициент формы выпуклости шва меньше 7) при использовании концентраторов магнитной индукции в намагничивающих устройствах можно достичь необходимой напряженности поля и индукции в зоне

контроля, а следовательно, и чувствительности метода при максимальной толщине и минимальной ширине подкладки, регламентируемых стандартами на сварку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 5264–80.** Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 35 с.
2. **ГОСТ 14771–76.** Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Стандартиформ, 1977. – 39 с.
3. **ГОСТ 8713–79.** Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Стандартиформ, 1977. – 35 с.
4. **ГОСТ 16037–82.** Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 24 с.
5. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.: ил.
6. Способ измерения магнитного поля на поверхности объекта: пат. ВУ 2154818 / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер. – Опубл. 30.10.2009.

Статья сдана в редакцию 24 мая 2024 года

Контакты:

valeria.pantyushina@mail.ru (Пантюшина Валерия Геннадьевна);
novikovva@tut.by (Новиков Владимир Алексеевич).

V. G. PANTYUSHINA, V. A. NOVIKOV

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FORMATION OF MAGNETOSTATIC FIELD ON THE SURFACE OF A BUTT-WELDED JOINT MADE ON AN UNREMOVED BACKING STRIP

Abstract

The formation of the tangential component of magnetostatic field intensity in the zone of a butt-welded joint made on an unremoved backing strip has been experimentally investigated during magnetization of the weld seam in the process of magnetographic control. During the experiments, the thickness of welded parts and the dimensions of the backing strip have been taken into account. Recommendations for selecting the dimensions of the backing strip are given.

Keywords:

magnetic control, butt weld, unremoved backing strip, backing plate parameters, weld convexity.

For citation:

Pantyushina, V. G. Experimental study of the formation of magnetostatic field on the surface of a butt-welded joint made on an unremoved backing strip / V. G. Pantyushina, V. A. Novikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 91–100.

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКОЛОГИЯ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-101-110

УДК 796.8

А. В. ЩУР¹, д-р биол. наук, доц.

И. В. ШИЛОВА¹, канд. техн. наук, доц.

М. В. РОМАНОВ², канд. техн. наук, доц.

А. А. АЛЕКСАНДРОНЕЦ¹

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

ВНУТРИОФИСНОЕ ВЕРТИКАЛЬНОЕ ОЗЕЛЕНЕНИЕ

Аннотация

Рассмотрены различные подходы к созданию внутриофисного вертикального озеленения: «карманные» системы, настольные устройства на основе бриофитоценоза, автоматизированные устройства, в том числе на основе гидропонных автоматизированных систем. Целью исследования является разработка вертикальных систем озеленения помещений, включающая опытные образцы стендов вертикального озеленения на основе почвенно-растительных систем, гидропонных и гравикультурных систем культивирования растений и мхов, разработанное программное обеспечение для автоматизации управления указанными установками с выводом состояния системы на мобильный телефон, планшет или компьютер. Предложенные системы позволяют оптимизировать качество атмосферного воздуха и улучшать микроклимат помещений, а также выращивать как декоративные растения, так и дикорастущие мхи и ампельные растения. Автоматизированная система вертикального озеленения позволяет, кроме вышеуказанных организмов, выращивать микрозелень и рассаду на основе разработанной рецептуры питательного раствора для гидропонной системы.

Ключевые слова:

вертикальное озеленение, автоматизированное управление системами вертикального озеленения, гидропонные системы, гравикультура, состав питательного раствора.

Для цитирования:

Внутриофисное вертикальное озеленение / А. В. Щур, И. В. Шилова, М. В. Романов, А. А. Александронец // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 101–110.

Введение

Стремительная модификация биосферы, проходящая путем техногенеза, привела к развитию техносферы. Артеприродная среда создает достаточно комфортные условия для существования человека и его самореализации, но в то же время разрушает его взаимодей-

ствие с природной средой [1–12].

Острая нехватка компонентов природы в современных городах привела к внедрению в архитектурные решения озеленение крыш, создание вертикальных садов на стенах домов, балконное озеленение и посадку микроскверов на площадках между зданиями, активизацию газонного озеленения террито-

рий. Методов достаточно много, но большинство из них дает эффект только в теплое время года. В холодный период, с учетом недостаточной освещенности, подобные решения малоэффективны и недостаточно эстетичны. Недостаток озеленения на фоне нехватки инсоляции часто приводит к осенне-зимним депрессиям у людей.

Снижение качества атмосферного воздуха может привести к различного рода заболеваниям человека, начиная от разнообразных аутоиммунных расстройств, заканчивая онкологией. Значительное воздействие на организм человека оказывают твердые частицы (пыль, сажа или копоть), вызывающие механические повреждения тканей органов дыхания, а также опасные химически активные вещества – сернистый газ, окись углерода, окислы азота, формальдегид [1–12]. Отмеченные экотоксиканты попадают в состав атмосферного воздуха через вентиляцию, при прямом проветривании помещений в жилые и рабочие зоны и представляют опасность для жильцов и работников.

В системе градостроительных мероприятий, направленных на решение проблемы охраны и улучшение качества окружающей среды в городе, особое место занимают зеленые насаждения, которые обладают целым комплексом разносторонних оздоровительных и средозащитных свойств. Одно из них – повышение комфортности микроклимата. Общегородские и внутриквартальные зеленые насаждения являются важным и обязательным элементом города и в санитарно-гигиеническом отношении. Зеленые насаждения влияют на ионизацию воздуха. Исследования показали положительное влияние ионизации на нервную систему человека. Зеленые насаждения по-разному ионизируют воздух, наилучший результат дают смешанные посадки. Кроме того, растения и мхи вырабатывают особые летучие и нелетучие вещества (фитонциды), угнетающие жизнедеятельность некото-

рых бактерий и микроорганизмов. Фитонциды разных растений и мхов неодинаково эффективны в борьбе с бактериями различных видов и штаммов, поэтому при подборе пород растений для озеленения городских территорий надо учитывать и эту их особенность.

Зеленые насаждения обладают большой испаряющей способностью. Они испаряют влаги в 20 раз больше, чем занимаемая ими площадь, при этом значительно понижая, за счет процесса испарения влаги с поверхности листьев, температуру окружающего воздуха, поэтому в теплое время года и в районах с жарким климатом озеленение особенно полезно. Но, повторимся, эффективность растений имеет ограниченный период. В зимнее время года многие растения сбросив листву, переходят из выделителей кислорода в его поглотители при дыхании. Вечнозеленые растения при низких температурах и недостаточной освещенности также перестают фотосинтезировать.

В небольших помещениях нецелесообразно высаживать крупные горшечные растения. На наш взгляд, наиболее экономически целесообразно, с целью улучшения качества воздуха, в небольших офисных и жилых помещениях использовать вертикальное озеленение. Считаем целесообразным, при проектировании жилых и небольших офисных помещений учитывать возможность создания стеллажных ниш для вертикального озеленения. Наиболее целесообразно их размещать напротив входных групп и оконных проемов. Возможно планировать размещение в зоне лестничных пролетов и коридорах. В случае оснащения осветительным оборудованием и автоматизированной системой управления освещением систем вертикального озеленения и использования в них теневыносливых растительных форм наличие источника дневного света перестает иметь значение. Создание автоматизированного полива вертикального озеленения позво-

лит уменьшить трудозатраты на его обслуживание. Предлагается в качестве варианта вертикального озеленения для помещений [13–16] использование бриофитоценоза, сочетающего в себе зеленые фотосинтезирующие мхи с растениями, эффективно поглощающими вредные вещества из воздуха. При этом можно производить зарачивание мхами вертикальных поверхностей в сочетании с многоярусными ступенчатыми размещениями ящиков с растениями, что позволит при минимальной затрате места иметь значительное растительное покрытие [14–16].

Целью исследования является разработка вертикальных систем озеленения помещений, включающее опытные образцы стендов вертикального озеленения на основе почвенно-растительных систем, гидропонных и гравикультурных систем культивирования растений и мхов, разработанное программное обеспечение для автоматизации управления указанными установками с выводом состояния системы на мобильный телефон, планшет или компьютер.

Задачами исследований являлись:

1) разработка опытных образцов вертикальных систем озеленения помещений на основе почвенно-растительных систем, гидропонных и гравикультурных систем культивирования растений и мхов;

2) разработка программного обеспечения для автоматизации управления установками вертикального озеленения с выводом состояния системы на мобильный телефон, планшет или компьютер;

3) составление и оценка рецептов питательных смесей для гидропонных и гравикультурных систем выращивания растений и мхов.

Материалы и методы

Гидропоника – метод выращивания растений без почвы в воде, содер-

жащей растворённые питательные вещества. Гидропонику от традиционного земледелия отличает то, что растения могут расти на инертной подложке (керамзит, минеральная вата, кокосовый войлок), которая обеспечивает физическую опору растению, но не питание. Гравикультура – один из вариантов гидропоники, который предусматривает использование в качестве закрепляющего субстрата гравия или других камней, не имеющих питательных свойств для растений, а также кварцевого песка. Питание растений обеспечивает водно-солевой раствор, подаваемый в субстрат, рецептура которого подбирается с учетом видовых особенностей растений.

Конструкционные особенности. В ходе работы установлено, что в основе конструкции следует применить электронные устройства и в качестве управляющего устройства используется отладочная плата Arduino Uno.

Arduino Uno контроллер построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых входов/выходов (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ), шесть аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Результаты и их обсуждение

Разработка внутренних систем вертикального озеленения.

Известны преимущества вертикального озеленения: при внешнем использовании оно позволяет скрывать недостатки зданий или сооружений; внутри зданий позволяет экономить место; обеспечивает шумоизоляцию; защищает от проникновения городской пыли; в целом создает благоприятный микроклимат и очищает атмосферный воздух в зоне размещения; имеет эсте-

тическое воздействие за счет создания яркого и запоминающегося образа.

Разработана и внедрена на территории Белорусско-Российского универ-

ситета так называемая «карманная» система вертикального озеленения (рис. 1).



Рис. 1. Система внутреннего вертикального озеленения

Данная система проста в создании, её можно создать в качестве элемента внутреннего декора и она легко вписывается в интерьер помещений. В настоящее время данная система продолжает функционировать и расположена в аудитории кафедры. Потребность в освещенности растений реализована за счет искусственного источника освещения – светодиодной лампы. Полив осуществляется вручную.

Следующим этапом разработки систем вертикального озеленения явилось создание настольной системы на основе бриофитоценоза. Опытные образцы представлены на рис. 2.

Особенностями данных систем являлась простота их создания и поддер-

жания, а также отсутствие потребности в подсветке. За счет указанных особенностей данные системы легко размещать в слабоосвещенных помещениях. В то же время мхи являются эффективными биофильтрами воздуха, очищая его от пыли и углекислого газа, а также от ряда токсичных веществ, и способны инактивировать микроорганизмы, что делает целесообразным размещение данных систем в местах массового пребывания граждан. Стоимость подобных систем небольшая, их создание не требует значительных навыков, что делает данные системы общедоступными.

Разработанные системы позволяют при минимальных размерах улучшать микроклимат помещений,

снижать содержание экопеллютантов помещений. В отличие от существующих на рынке фитомодулей [13], авторские разработки могут быть вы-

полнены самостоятельно из подручных материалов и иметь минимальную стоимость.



Рис. 2. Системы вертикального озеленения на основе заравнивания мхами вертикальных поверхностей

Автоматизированные системы вертикального озеленения.

При конструировании управляющих устройств для гидропонных систем вертикального озеленения основными входными параметрами являются температура и влажность воздуха и грунта, значения которых получают с соответствующих датчиков. Выходные параметры – это данные с датчиков, которые записываются на устройство хранения, а также режимы работы, основанные на входных параметрах (рис. 3).

После подключения аппарата к блоку питания подаётся напряжение 12 В. Далее переменный ток поступает на устройство регулировки мощности, где напряжение снижается до 5 В и подаётся на устройство управления. Устройство управления принимает данные с датчиков температуры и с датчиков параметров почвы и выстраивает режим работы. Система освещения и система вентиляции питаются от устройства

управления. Система полива работает на основе внешних и внутренних параметров системы. Считанная информация и режимы работы сохраняются на устройство записи и могут быть считаны напрямую, либо путём беспроводной связи через устройство беспроводной передачи. Общий вид проектируемого устройства представлен на рис. 4.

Благодаря устройству управления можно оперативно считывать показания с датчиков и передавать их по беспроводной сети с помощью устройства беспроводной связи или сохранять на устройство записи. А также можно осуществлять коррекцию данных через разработанную программу, размещаемую в смартфоне. Загрузка программы сайта университета возможна по ссылке или с одного смартфона на другой. Программа имеет открытую архитектуру, что позволяет добавлять датчики в систему, либо оптимизировать управление [17].

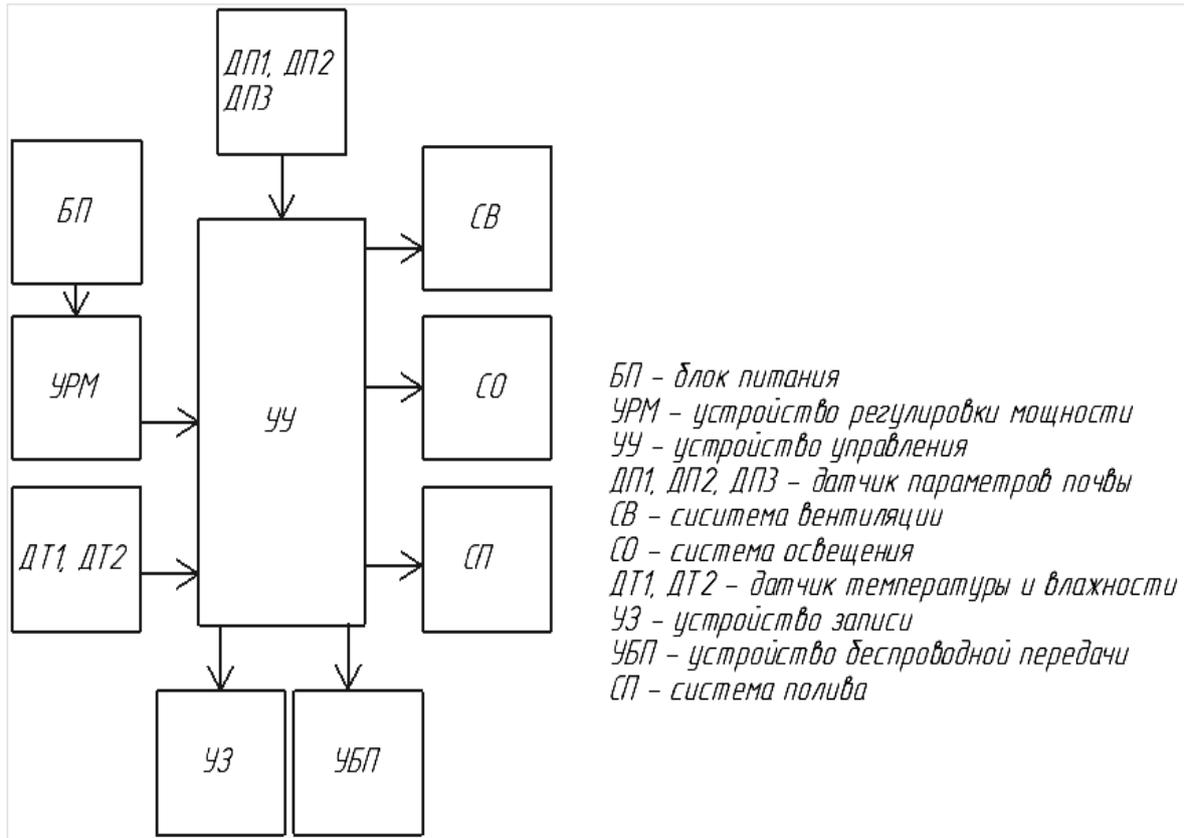


Рис. 3. Структурная схема установки вертикального озеленения на основе гидропоники



Рис. 4. Система вертикального озеленения на основе гидропоники

Исходя из запроюктированных возможностей системы, она может работать практически автономно с учетом потребностей растений, выращиваемых в ней. При этом в программное обеспечение системы заложена возможность ручного управления, а также изменения параметров освещения, температуры и интенсивности полива растений с учетом их потребностей. Благодаря модульности устройства возможно выращивание одновременно горшечных растений, гравикультурных модулей и почвенных, а также гидропонных модулей с отдельным управлением данными модулями по освещенности и подаче питательного раствора. В данном устройстве выращивается микрозелень, что позволяет использовать его не только как эстетически значимый и экологически важный (или как средство очистки воздуха в помещениях) прибор, но и как источник витаминов для студентов и преподавателей [13–16].

Выбор состава питательного раствора для гидропоники.

Осуществлен литературный поиск и на его основании предложено три рецепта препаратов для полива и использования в гидропонике, наиболее полно обеспечивающие потребность растений в питательных веществах.

Рецепт препарата № 1

1. Кальциевая селитра (нитрат кальция) – 1,000 г.
2. Фосфат калия однозамещенный – 0,250 г.
3. Сульфат магния – 0,250 г.
4. Хлорид калия (калийная соль) – 0,125 г.
5. Хлорид железа – 0,0025 г.
6. Хелат железа – 0,010 г.

На каждый литр раствора препарата № 1 необходимо добавлять 1 см³ раствора микроэлементов.

Рецепт микроэлементов для препарата № 3

1. Хлористый литий – 0,03 г.
2. Сульфат меди – 0,06 г.

3. Борная кислота – 0,61 г.
4. Сульфат алюминия – 0,06 г.
5. Хлористое олово – 0,03 г.
6. Йодистый калий – 0,03 г.
7. Бромистый калий – 0,05 г.
8. Сульфат цинка – 0,06 г.
9. Двуокись титана – 0,06 г.
10. Хлористый марганец – 0,4 г.
11. Сульфат никеля – 0,06 г.
12. Нитрат кобальта – 0,06 г.

Вес веществ рассчитан на растворение в объеме 1 л дистиллированной воды, при необходимости можно осуществлять кратный пересчет согласно требуемому объему готового препарата. Растворение веществ для всех трех препаратов необходимо проводить индивидуально в небольшом объеме дистиллированной воды при температуре не менее 20 °С, затем последовательно сливать растворы в одну мерную колбу объемом 1000 см³ и доливать дистиллированную воду до мерной метки.

Рецепт препарата № 2

1. Нитрат кальция – 1,000 г.
2. Сульфат магния – 0,500 г.
3. Монокалийфосфат – 0,300 г.
4. Сульфат аммония – 0,100 г.
5. Цитрат железа – 0,050 г.
6. Сульфат марганца – 0,002 г.
7. Бура – 0,002 г.
8. Сульфат цинка – 0,001 г.
9. Сульфат меди – 0,001 г.

Рецепт препарата № 3

1. Монокалийфосфат – 0,140 г.
2. Калийная селитра – 0,550 г.
3. Кальциевая селитра – 0,100 г.
4. Сульфат магния (кристаллический) – 0,140 г.
5. Сульфат железа (двухвалентный) – 0,020 г.
6. Сульфат марганца – 0,002 г.
7. Бура – 0,02 г.
8. Сульфат цинка – 0,001 г.
9. Сульфат меди – 0,001 г.

Проведен контроль влияния рецептур препаратов на всхожесть семян. В качестве модельного объекта выбраны семена гороха посевного, как одного из наиболее чувствительных растений

на ранних стадиях онтогенеза к токсическому воздействию химических веществ. Проращивание семян проводилось в чашках Петри на свету. Оценка показателей проводилась по соответ-

ствующим общепринятым методикам. В табл. 1 представлены результаты изучения воздействия препаратов на прорастание семян.

Табл. 1. Влияние различных питательных сред на ростовые процессы семян гороха

Вариант опыта	Энергия прорастания, %	Лабораторная всхожесть, %	Длина роста, см	Длина корешка, см
1. Семена сухие (без обработки)	97,5	98,0	4,94	6,14
2. Семена, обработанные водой (контроль)	92,0	92,5	4,74	6,60
3. Семена, обработанные препаратом № 1	97,0	99,0	6,68	8,49
4. Семена, обработанные препаратом № 2	96,0	98,0	6,28	8,53
5. Семена, обработанные препаратом № 3	91,0	94,5	6,05	6,99
6. Семена, обработанные смесью препаратов № 1 и 2	96,0	98,0	6,76	8,83
7. Семена, обработанные смесью препаратов № 1 и 3	95,0	98,0	8,52	10,29
НСР ₀₅	3,87	3,14	1,09	0,99

Лабораторная всхожесть гороха в вариантах с применением предложенных препаратов оказалась на одном уровне с вариантом, где проращивались сухие семена. Ростовые процессы при обработке семян предложенными рецептурными смесями проходили активнее, чем без применения препаратов. Наблюдалось во всех экспериментальных вариантах 3–7 достоверное отличие длины роста от контроля и варианта 1.

Установлено, что в вариантах 6 и 7 совместное действие препарата № 1 с другими оказалось наиболее эффективным. При этом разница с контролем составила 2,02 см, или 29,3 % (вариант 6), и 3,78 см, или 44,4 % (вариант 7).

Раздельное применение изучаемых препаратов и их совместное использование с препаратом № 1 оказало положительное влияние на длину корешка. В лучших вариантах 6 и 7 превышение над контролем составило 2,23 и 3,69 см соответственно (25,3 % и 35,9 %). В то же время обработка семян только одним препаратом № 3 (вариант 5) не оказала положительного эффекта, в этом варианте длина корешка не отличалась от

контроля.

Таким образом, при обработке семян предложенными рецептурными препаратами выявлена разная реакция культуры на их действие. На наш взгляд, целесообразнее всего использовать препарат № 1, как наиболее полно обеспечивающий потребность в питательных веществах и наименее токсичный для растений на ранних стадиях онтогенеза [18].

При сравнении с существующими аналогами следует отметить уникальность разработанной системы и программного обеспечения к ней, т. к. большинство действующих аналогов не имеют системы программирования и автоматизированного поддержания заданных параметров, интегрируемых в «интернет вещей» и систему «умный дом» [19–23].

Заключение

Резюмируя, следует отметить, что существуют различные системы вертикального озеленения – от самых простых до автоматизированных. Предло-

женные системы позволяют оптимизировать качество атмосферного воздуха и улучшать микроклимат помещений, а также выращивать как декоративные растения, так и дикорастущие мхи и ампельные растения. Автоматизированная система вертикального озеленения позволяет, кроме вышеуказанных организ-

мов, выращивать микрозелень и рассаду на основе разработанной рецептуры питательного раствора для гидропонной системы. Разработанное программное обеспечение позволяет интегрировать предлагаемое устройство в «интернет вещей» и систему «умный дом».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы общей и прикладной экологии / М. В. Романов [и др.]. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. – 171 с.
2. Инженерная экология: учебное пособие / А. В. Щур [и др.]. – Рязань: ИП Коняхин А. В. (Book Jet), 2021. – 180 с.
3. Экология: учебник / А. В. Щур [и др.]. – Рязань: ИП Викулов К. В., 2021. – 248 с.
4. Управление природными рисками: монография / А. Н. Чусов [и др.]. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2024. – 403 с.
5. Безопасность жизнедеятельности человека: учебно-методическое пособие / А. В. Щур [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 422 с.
6. **Щур, А. В.** Подходы к очистке воздуха офисных и жилых помещений / А. В. Щур, А. А. Александронец // Безопасный и комфортный город: сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 6–8 июня 2022 г. – Орел: Орлов. гос. ун-т имени И. С. Тургенева, 2022. – С. 383–385.
7. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / А. В. Щур [и др.]. – Могилев; Рязань: ИП Коняхин А. В. (Book Jet), 2021. – 246 с.
8. **Shchur, A.** Revitalization of (post-) Soviet neighbourhood with nature-based solutions / A. Shchur, N. Lobikava, V. Lobikava // Acta Horticulturae et Regiotecturae. – 2020. – Vol. 23, № 2. – P. 76–80.
9. Оценка качества воздуха помещений на полигонах твердых коммунальных отходов по микробному загрязнению и способ его очистки / К. В. Воробьев [и др.] // Поволж. эколог. журн. – 2023. – № 1. – С. 20–36.
10. Results of investigations of usage the environmental friendly technology for the air purification in non-industrial buildings / K. Vorobjev [et al.] // BIO Web of Conferences 64, 02005 (2023) Agro-Bio-Technologies 2023.
11. Indoor Air Quality Assessment on Polygons for Solid Municipal Waste for Microbial Contamination and a Method of Cleaning It / K. V. Vorobyev [et al.] // Biology Bulletin. – 2023. – Vol. 50, № 10. – P. 124–131.
12. **Щур, А. В.** Проблемы качества воздушной среды и направления их решения / А. В. Щур, Т. Н. Агеева, Г. Н. Дракин // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: материалы II Междунар. науч. конф., Макеевка, 15 февр. 2024 г. – Макеевка: Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры, 2024. – С. 295–297.
13. Создание системы вертикального озеленения своими руками [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sad-doma.net/dacha-dom/fitomoduli-svoimi-rukami.html/>. – Дата доступа: 19.02.2024.
14. **Александронец, А. А.** Использование внутриофисного вертикального озеленения при проектировании зданий / А. А. Александронец, Р. В. Терещенко, А. В. Щур // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 107.
15. **Александронец, А. А.** Современные подходы к вертикальному озеленению помещений / А. А. Александронец, А. В. Щур // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 256–257.
16. **Александронец, А. А.** Применение вертикального озеленения помещений в городском строительстве / А. А. Александронец, А. В. Щур // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 13–16.
17. Управление лабораторным стендом по вертикальному озеленению жилых и производственных помещений: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 1630-КП / А. В. Щур, Р. В. Терещенко. – Оpubл. 08.09.2023.
18. **Валько, О. В.** Гидропонная система внутриофисного вертикального озеленения / О. В. Валько, А. В. Щур, Д. В. Виноградов // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспек-

ты современных агротехнологий, Рязань, 6 апр. 2023 г. – Рязань: Рязан. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева, 2023. – С. 32–36.

19. Шарипова, Г. И. Вертикальное озеленение стен как направление фитодизайна / Г. И. Шарипова, А. Ш. Тимерьянов // Аграрная наука – сельскому хозяйству: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 80-летию Алтайского ГАУ, Барнаул, 9–10 февр. 2023 г.: в 2 кн. – Барнаул: Алтайский гос. аграр. ун-т, 2023. – Кн. 2. – С. 50–52.

20. Баззаева, Е. С. Вертикальное озеленение в интерьере помещения как один из элементов улучшения параметров его микроклимата / Е. С. Баззаева, С. Н. Витязь // Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы: материалы VII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Кемерово, 2021. – С. 104–109.

21. Фитомодуль для вертикального озеленения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fitogreen.ru/catalog/13/38/>. – Дата доступа: 12.10.2022.

22. DG-Home. Вертикальное озеленение в интерьере квартиры или дома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dg-home.ru/blog/vertikalnoe-ozelenenie-v-kvartire_b591597. – Дата доступа: 12.10.2022.

23. Bazzaeва, E. S. Vertical landscaping as a way to increase the comfort of the interior / E. S. Bazzaeва // Современные технологии в сфере сельскохозяйственного производства и образования: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. на иностранных языках, Кемерово, 27 окт. 2022 г. – Кемерово: Кузбас. гос. с.-х. акад., 2022. – Р. 166–169.

Статья сдана в редакцию 21 мая 2024 года

Контакты:

shchur@yandex.by (Щур Александр Васильевич);

irina.schilova@tut.by (Шилова Ирина Владимировна);

rom@spbstu.ru (Романов Михаил Васильевич);

putinagutin88@gmail.com (Александронец Алексей Александрович).

A. V. SHCHUR, I. V. SHILOVA, M. V. ROMANOV, A. A. ALEXANDRONETS

IN-DOOR OFFICE VERTICAL GARDENING

Abstract

The article discusses various approaches to creating intra-office vertical gardening, such as «pocket» systems, desktop installations based on bryophytocenosis, automated installations, including those based on hydroponic automated systems. The purpose of the research is to develop vertical systems of indoor gardening, including prototypes of vertical gardening stands based on soil and vegetation systems, hydroponic and gravicultural systems for cultivating plants and mosses, developed software for automating the control of these installations with the output of the system status on a mobile phone, tablet or computer. The proposed systems make it possible to optimize the quality of atmospheric air and to improve indoor microclimate, as well as to grow both ornamental plants and wild mosses and ampelous plants. The automated vertical gardening system allows, in addition to the above-mentioned organisms, growing microgreens and seedlings based on the developed formulation of a nutrient solution for the hydroponic system.

Keywords:

vertical gardening, automated control of vertical gardening systems, hydroponic systems, graviculture, nutrient solution composition.

For citation:

In-door office vertical gardening / A. V. Shchur, I. V. Shilova, M. V. Romanov, A. A. Alexandronets // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 101–110.

МАТЕМАТИКА . ИНФОРМАТИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-111-121

УДК 004.9:378.141.4

В. А. ШИРОЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ КАФЕДРЫ ВУЗА

Аннотация

Проведен анализ существующих подходов и разработок программных систем для расчёта и распределения учебной нагрузки на кафедрах учебных вузов. Изучен процесс подготовки исходной информации и ее обработки. Предложена программная система, обладающая удобным интерфейсом, позволяющая значительно повысить оперативность и качество расчёта, распределения учебной нагрузки между преподавателями и контроля ее выполнения.

Ключевые слова:

автоматизация, программная система, расчет учебной нагрузки, распределение учебной нагрузки, контроль выполнения учебной нагрузки.

Для цитирования:

Широченко, В. А. Автоматизированная система расчета, распределения и анализа учебной нагрузки кафедры вуза / В. А. Широченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 111–121.

Введение

В последнее время появилось множество публикаций о выполненных исследованиях и разработках в области автоматизации управленческой деятельности на кафедрах учебных вузов. В Республике Беларусь и в Российской Федерации зарегистрирован ряд программных продуктов, предназначенных для этих целей. Описанные в публикациях программные продукты имеют различную степень системности и построены на различных платформах. Некоторые из них реализованы с использованием языков высокого уровня C# [1, 2] и Delphi [3], некоторые используют Visual Basic в сетевой вер-

сии [4] или Visual Basic for application в среде Excel [5, 6] или Access [7]. Появился заметный прогресс в использовании платформы 1С [8, 9]. Это обосновано пониманием необходимости применения системного подхода к автоматизации управленческих процессов и тем, что часть процессов уже автоматизированы в этой среде (бухгалтерия, кадры, составление расписаний). Тем не менее расчёт и распределение учебной нагрузки преподавателей требует значительного применения вычислительных алгоритмов. В связи с этим ряд программных продуктов созданы на основе языков высокого уровня, но имеют интерфейсы со средствами, позволяющими осуществлять интеграцию с

имеющимися базами данных и обладающими мощными возможностями для представления и документирования результатов.

Возросшее количество названных разработок говорит о том, что потребность в автоматизации осознается все более ярко и что такие разработки действительно актуальны.

Основная часть

Руководитель кафедры в учебном вузе несёт значительную ответственность по подготовке разнообразной документации. Одновременно он участвует в учебном процессе, выступая в роли преподавателя согласно расписанию занятий. Как следствие, на подготовку документации отводится фрагментированное время в перерывах между занятиями. Такой подход сопровождается множественными прерываниями, что может приводить к потере оперативности, возникновению неточностей и ошибок. В связи с этим становится очевидной необходимость сокращения объема работы по подготовке документации путем автоматизации управленческой деятельности с помощью современных информационных технологий.

Одной из самых затратных задач для заведующего кафедрой является разработка документации, связанной с учетом учебной нагрузки, ее распределением между членами кафедры, контролем выполнения задач и подготовкой сопутствующих документов. Составление указанной документации требует сбора обширного объема информации, поступающей из различных подразделений университета, и значительных временных затрат. На сегодняшний день вся необходимая информация доступна в электронном формате, но для подготовки документов все еще требуется создание печатных копий, что затрудняет автоматизацию процесса считывания данных. В результате этого страдают скорость и точность подго-

товки документов.

На рис. 1 изображена схема, иллюстрирующая процесс подготовки документации, используемой при управлении кафедрой. Из представленной схемы видно, что разработка документации начинается с основной информации, такой как учебные планы, приказы о закреплении дисциплин за кафедрами, данные о студентах и нормативах времени на проведение различных образовательных процедур, применяемых университетом. Используя эти данные, рассчитывается учебная нагрузка для преподавателей всех кафедр учебного заведения. Многие считают, что централизованное выполнение этой работы в рамках единой системы на основе базы данных университета является наиболее эффективным подходом. Далее, каждая кафедра может получить свою часть учебной нагрузки из этой базы данных и продолжить работу по формированию своей управленческой документации на ее основе.

Такой подход позволяет упростить процесс сбора и использования необходимой информации, а также обеспечивает единый и надежный источник данных для всех кафедр учебного заведения. Централизация данных также способствует снижению ошибок и дублирования информации, что, в свою очередь, повышает оперативность и эффективность работы персонала.

Однако каждая кафедра, имея свою уникальную систему управления и подходы к распределению учебной нагрузки, может предпочесть обособленный процесс формирования своей документации с применением локальной программы. Проектирование такой программы на основе базы данных требует значительных ресурсов для разработки инструментов формирования документов, их настройки и создания резервных копий. В этом случае целесообразно подготовить централизованную и актуальную базу данных о закреплении за каждой кафедрой дисциплинах и

действующих учебных планах. Это позволит значительно сократить сроки под-

готовки информации к расчёту нагрузки отдельной кафедрой.



Рис. 1. Схема процесса подготовки документации по управлению кафедрой

В таких условиях использование табличного процессора для создания упомянутой программы может представляться более эффективным решением. Табличные процессоры, такие как Microsoft Excel или Google Sheets, обладают широким спектром инструментов для работы с данными и создания документов. Они позволяют легко структурировать информацию, проводить вычисления, создавать отчеты и документацию.

В Белорусско-Российском университете кафедрой «Автоматизированные системы управления» совместными усилиями преподавателей и студентов разработано специальное программное обеспечение для автоматизации подготовки кафедральной документации. Поскольку централизованная система, объединяющая все учебные планы уни-

верситета, еще не готова к запуску, данная программа включает локальную подсистему для расчета учебной нагрузки для отдельных кафедр.

Программа является полноценным программным продуктом, созданным с использованием языка программирования Visual Basic for Application (VBA) в среде Microsoft Excel. Это позволило создать развитый многооконный интерфейс и использовать мощные инструменты табличного процессора Excel для удобного форматирования результирующих данных под любые предпочтения пользователя.

Новизна заключается в том, что для удобства настройки программы под особенности каждой кафедры и простоты ее сопровождения она состоит из нескольких модулей, разнесенных в отдельные книги (Excel-файлы), в одной

из которых расположен программный код, во второй – информация о дисциплинах из учебных планов и в третьей – печатные формы, являющиеся результатом работы программы.

Такой подход дает возможность кафедре эффективно использовать уже знакомые инструменты (Excel) и дополнительную развитую функциональность, позволяющую ускорить и упростить процессы подготовки документов, расчета учебной нагрузки и других аспектов управления кафедрой. Это значительно упрощает внедрение программного продукта среди пользователей, т. к. большинство работников уже знакомы с этими инструментами. Ис-

пользуя предоставленный функционал программы, пользователь имеет возможность вводить исходную информацию из учебных планов и о контингенте студентов по своему выбору: либо вручную через интерфейс программы, либо путем импорта из существующих электронных документов. Пример фрагмента страницы с информацией из учебных планов представлен на рис. 2. После этого происходит автоматический расчет учебной нагрузки для данной кафедры и формирование печатной копии соответствующего документа в полном соответствии с требованиями учебной части университета.

	A	B	C	D	E	F	G	K	L	M
1	Дисциплины учебных планов по кафедре АСУ									
2	Бюджет	Ступень	Специальность	Аббревиатура	Форма	Шифр				
3	РБ	Бакалавры	Автоматизированные системы обработки информации АСОИ		Дневное 1-53 01 02					
4			Название дисциплины	Семестр	Неделя	Контроль	КП/КР/	Лекции	Лаб	Практ
5			Информационные системы и технологии	1	17	Зачет		16	16	
6			Архитектура ЭВМ	1	17	Экзамен		34	16	
7			Основы патентоведения	1	17	Зачет		16		
8			Дискретная математика	2	17	Зачет		34	16	
9			Построение и анализ алгоритмов	2	17	Зачет		34	16	
10			Операционные системы	3	17	Зачет		34	16	
11			Вычислительные методы и компьютерная алгебра	3	17	Зачет		34	16	
12			Теория графов	3	17	Зачет		34	16	
13			Технологии проектирования программного обеспечения	4	17	Экзамен	КР	34	34	16
14			Основы компьютерной графики	4	17	Зачет		16	34	

Рис. 2. Фрагмент задания информации об учебных дисциплинах, закрепленных за кафедрой

Следует отметить, что программа предусматривает систему различных проверок, которая помогает снизить вероятность ввода некорректной информации. Такие проверки включают в себя контроль диапазона значений, проверку на соответствие форматам данных, а также другие механизмы, направленные

на обеспечение правильности и точности вводимой информации. Применение системы проверок не только повышает эффективность и точность работы пользователя в программе, но также способствует повышению качества получаемой документации. Путем их внедрения в программу удастся

уменьшить возможные ошибки и улучшить общую надежность результатов, что важно для эффективного управления учебной нагрузкой и формирования кафедральной документации.

Кроме листов с подробным расчётом учебной нагрузки кафедры, в качестве результата создается лист интегрированной информации, фрагмент которой представлен на рис. 3.

Итоговые данные по расчету нагрузки							
Период	Бюджет РБ						
	Обязательная почасовая нагрузка						Всего нагрузки
	Председатель ГЭК	Количество приглашенных членов ГЭК	Нагрузка членов ГЭК	Рецензирование ДП	Всего обязательной почасовой нагрузки		
Первая ступень							
Осенний семестр по дневному отделению I ступени	Б						2195,70
	В						324,75
Всего							2520,45
Осенний семестр по заочному отделению I ступени	Б	7	2	7,0	28	42,0	501,00
	В	14		14,0	56	84,0	1080,25
Всего		21		21,0	84	126,0	1581,25
Итого за осенний семестр							
Итого за осенний семестр I ступени	Б	7	2	7,0	28	42,0	2696,7
	В	14		14,0	56	84,0	1405,0
Всего		21		21,0	84	126,0	4101,7
Весенний семестр по дневному отделению I ступени	Б	21	2	21,0	84	126,0	2485,20
	В	2		2,0	8	12,0	346,75
Всего		23		23,0	92	138,0	2831,95
Весенний семестр по заочному отделению I ступени	Б		2				267,40
	В	22		22,0	88	132,0	1654,20
Всего		22		22,0	88	132,0	1921,60
Итого за весенний семестр							
Итого за весенний семестр I ступени	Б	21,0	4	21,0	84	126,0	2752,60
	В	24,0		24,0	96	144,0	2000,95
Всего за весенний семестр I ступени		45		45,0	180	270,0	4753,55
Итого по первой ступени							
Итого за год по I ступени	Б	28	6	28,0	112	168,0	5449,3
	В	38		38,0	152	228,0	3406,0
Всего за год по I ступени		66		66,0	264	396,0	8855,25

Рис. 3. Фрагмент интегральной информации о нагрузке кафедры

Используя информацию в таком виде, учебный отдел может легко видеть, какую часть учебной нагрузки необходимо предоставлять для приглашаемых специалистов, а какая предназначена для распределения между преподавателями кафедры. Это даёт воз-

можность руководству выделять необходимое количество штатных единиц на кафедру, представившую указанную информацию.

Программа также отлично справляется с автоматизацией распределения учебной нагрузки между преподавате-

лями на кафедре. Благодаря возможностям развитого многооконного интерфейса с помощью главного монитора программы, представленного на рис. 4, заведующий кафедрой имеет возможность эффективно контролировать различные аспекты распределения учебной нагрузки. Он может легко отслеживать среднюю нагрузку по кафедре, корректировать повышающие и понижающие

коэффициенты, управлять долей звонковой нагрузки, а также контролировать другие особенности распределения. Представленный монитор позволяет в процессе работы получать справку о пока еще нераспределенных дисциплинах, о всей нагрузке конкретного преподавателя и сопоставлять нагрузку преподавателей по разным бюджетам.

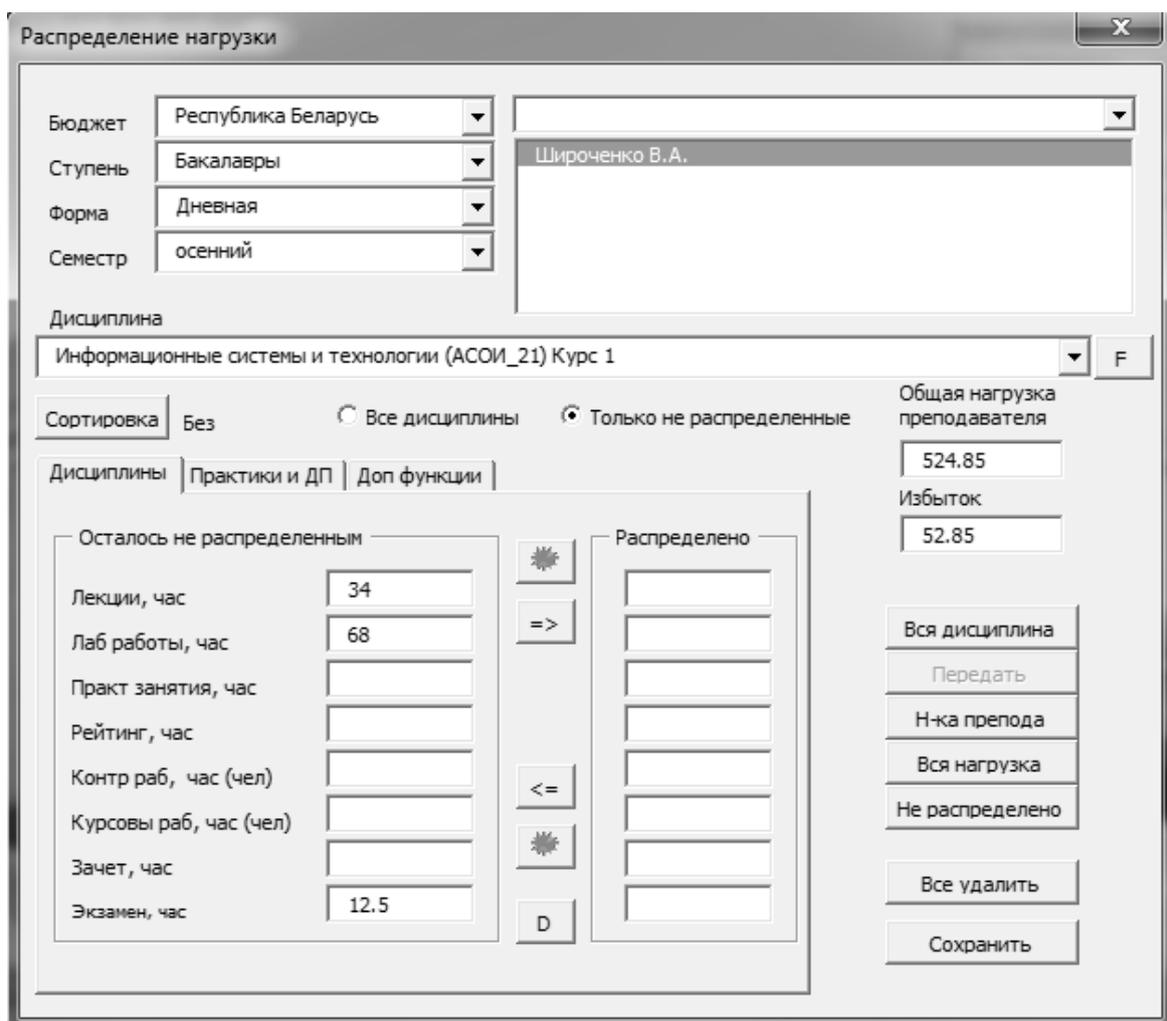


Рис. 4. Главный монитор распределения нагрузки

Это представляется очень удобным и позволяет заведующему кафедрой более эффективно управлять процессом распределения учебной нагрузки, обеспечивая баланс и справедливость в распределении обязанностей среди преподавателей кафедры. Такой монитор не

только облегчает работу, но и повышает прозрачность процесса управления учебной нагрузкой на кафедре.

Формирование результирующего документа в программе осуществляется в табличной форме, что обеспечивает возможность просмотра учебной

нагрузки преподавателей по дисциплинам и их компонентам. Этот документ предоставляет детальное представление нагрузки преподавателей, позволяя анализировать информацию в разрезе конкретных дисциплин и их составляющих элементов. Представление информации в таком виде значительно облегчает контроль и управление учебной нагрузкой на кафедре, помогая более точно распределять задачи между преподавателями. Кроме того, программа позволяет отобразить документ в интегрированном виде, способном быть напечатанным и переданным в учебный отдел. Это удобно для дальнейшего анализа, хранения и предоставления информации, обеспечивая необходимую гибкость в представлении данных в соответствии с потребностями кафедры и учебного заведения в целом.

Программа предоставляет удобные возможности для адаптации к изменениям в контингенте студентов и их структуре. При внесении изменений в контингент программное обеспечение позволяет автоматически пересчитать учебную нагрузку на кафедре. Это дает возможность выявить информацию о дополнительной и еще не распределенной нагрузке или о несуществующей нагрузке в связи с уменьшением количества студентов.

После выявления таких изменений программа предлагает возможность легко корректировать распределение нагрузки. Это важное преимущество, поскольку позволяет оперативно реагировать на изменения в образовательном процессе и эффективно перераспределять задачи и обязанности между преподавателями кафедры. Такие функции делают программу гибкой и адаптивной к текущим условиям и учитывают динамическую природу образовательного процесса. Возможность быстро и точно реагировать на изменения в структуре студенческого контингента способствует оптимизации процесса управления учебной нагрузкой на кафедре и обеспечива-

ет более эффективное использование ресурсов и времени преподавателей.

Контроль выполнения учебной нагрузки становится более эффективным благодаря возможности формирования индивидуальных планов преподавателей с использованием программы. Эти планы представлены в виде двух взаимосвязанных таблиц с плановой и фактической нагрузкой, что полностью соответствует формату индивидуальных планов на бумажных носителях, используемых в университете. Выполняя образовательную деятельность, преподаватели ежемесячно, используя эти файлы на странице «Выполнение», вносят информацию о выполненной нагрузке, которая в последующем используется для подведения итогов по кафедре.

Для удобства сбора информации от преподавателей создан специальный аккаунт Google, на котором размещены таблицы индивидуальных планов преподавателей. Доступ к этим таблицам преподаватели получают через соответствующие ссылки, которые им приходят на электронную почту. Необходимость создания такого обмена обосновано тем, что предоставление ссылок на файл, в котором моментально отображаются внесенные респондентом данные, значительно менее трудозатратно, чем пересылка самого файла респонденту и получение его обратно. Кроме того, использование ссылки создает более мощный побудительный момент для внесения информации преподавателями и не требует от них никаких дополнительных действий.

Созданная программная система ведения документации обладает удобной и эффективной поисковой системой, которая позволяет оперативно выявить, какие виды занятий назначены конкретному преподавателю, а также определить, кому из преподавателей поручено проведение занятий по определенной дисциплине. Если дисциплина ведется несколькими преподавателями, программа способна определить всех

исполнителей и предоставить соответствующую информацию.

Это важное свойство позволяет быстро реагировать на запросы и обращения в течение учебных семестров, а также упрощает процесс управления занятиями и нагрузкой преподавателей. Благодаря поисковой системе программы можно оперативно получать информацию о распределении занятий, определять ответственных преподавателей,

а также осуществлять другие запросы, связанные с организацией учебного процесса на кафедре. На рис. 5 показано, как на основе коротких буквенных сочетаний отыскиваются соответствующие дисциплины по одной заданной специальности или по всем специальностям по кафедре. После нахождения нужной дисциплины можно легко узнать, кто из преподавателей занят в ее проведении.

Поиск дисциплин

Дисциплина или специальность: ав

Специальность: [dropdown]

Дисциплина	Ф	Ст	Б	К	Се
	о	уп	ю	у	ме
	р	ень	д	р	ст
	м		ж	с	р
	а		е		
			т		
1 Теория и методы автоматического управления (АСОИ_21)	д	б	РБ	3	о
2 Математические модели информационных процессов и управления (АСОИзао)	з	б	РБ	4	о
3 Теория и методы автоматического управления (АСОИ_21сокр)	з	б	РБ	2	о
4 Интеллектуальные информационные системы / Системы управления ресурсами пред	з	б	РБ	3	о
5 Интеллектуальные информационные системы / Системы управления ресурсами пред	д	б	РБ	3	в
6 Теория и методы автоматического управления (АСОИ_21зао)	з	б	РБ	3	в
7 Управление стартап-проектами (СА1.8)	д	м	РБ	1	о

Удалить

Изменить

Рис. 5. Форма поиска сведений о дисциплине

Таким образом, программа предоставляет обширный функционал, включая сервисные возможности, которые значительно облегчают процесс управления учебной нагрузкой и составления расписания занятий на кафедре. Например, она позволяет подготовить информацию для составления расписания по всем видам занятий, проконтролировать выполнимость расписания путем обна-

ружения возможных конфликтов, так называемых «накладок», когда преподаватель должен быть в двух разных местах одновременно, составить план издания необходимых методических материалов по вновь вводимым дисциплинам или для замены устаревших пособий с определением ответственных исполнителей. Кроме того, программа помогает контролировать правильность

заполнения отчетов о выполненной нагрузке преподавателями на основе расписания занятий, обеспечивая точность и надежность в отчетности.

Расчет и распределение учебной нагрузки в первый год использования программы, несмотря на всю простоту действий, требует значительных затрат на подготовку и настройку системы. В последующие годы, когда список специальностей и дисциплин уже был создан, потребуется лишь его проверить и при необходимости откорректировать. При этом если сразу внести в таблицу все дисциплины специальности и отметить, что использоваться будут только дисциплины первого курса, а остальные неактивны, то по мере перехода студентов с курса на курс потребуется лишь только изменять указанную отметку, т. е. сделать дисциплины активными.

После задания нового контингента студентов расчёт и формирование соответствующих документов занимает буквально минуту. При создании нового распределения нагрузки между преподавателями для следующего года можно воспользоваться распределением прошлого года, откорректировав его, или начать все заново. Технически эти действия также не требуют большой трудоемкости. Время их выполнения будет определяться не программой, а временем, необходимым для согласования решений заведующего кафедрой с преподавателями.

Программа позволяет в автоматизированном режиме удалить из распределения нагрузки дисциплины прошлого года, которые в нагрузке текущего года отсутствуют, и откорректировать часы, отводимые на зачеты и экзамены, в соответствии с новым контингентом студентов. Остальные корректировки можно выполнять в режиме многооконной работы, как это показано на рис. 6.

Из рисунка видно, как с помощью поиска дисциплины в левом окне на главном мониторе можно увидеть, за

кем из преподавателей она закреплена, в правом окне увидеть нагрузку конкретного преподавателя, а в нижнем – нагрузку всех преподавателей. Такое представление информации позволяет заведующему увидеть полную картину распределения и принять обоснованное решение о перераспределении учебной нагрузки.

Заключение

Проведенный анализ существующего программного обеспечения позволяет сделать следующие выводы.

Несмотря на то, что все вузы Беларуси и России работают по своим законодательствам в области образования, которые, впрочем, довольно близки, практически все вузы имеют свои особенности в управлении образовательным процессом, которые требуют не столько специфических алгоритмов, сколько привычных интерфейсов и последовательностей действий для соответствующих специалистов.

Вузы, являясь центрами по подготовке специалистов, способны осуществлять собственные проекты по автоматизации собственной деятельности. Для них более выгодно создавать собственные программные продукты, учитывающие привычные особенности управления, а не полагаться на универсальные, которые к тому же достаточно дороги.

Явно выражена потребность в рассмотрении управленческой деятельности в вузах с системных позиций для реализации комплексной автоматизации и оптимизации управленческих процессов в образовательной деятельности.

Большинство из рассмотренных программных продуктов имеют довольно развитый дружественный интерфейс, однако задача управления является весьма сложной и по-прежнему требует дальнейших новых идей и разработок для ее упрощения и наглядности.

Распределение нагрузки

Нагрузка преподавателя: Широченко В.А.

Обновить

Дисциплина

1 Исследование операций (ПИР_20)

Общая нагрузка преподавателей бюджета Российской Федерации

Преподаватели	Осень	Весна	Ауд: % час	Ставка	Всего	Перебор Недобор
1 Ковальчук В.М.	150	100	100	250	251.5	250
2 Столярков Ю.Д.	60.1	446.8	52	266	251.5	506.9
3 Борчик Е.М.	112	379.95	65	320	503	491.95
4 Широченко В.А.	0	121	91	110	251.5	121
						130.5

Рис. 6. Многооконная работа с информацией в программе

Выполненная разработка успешно протестирована на кафедрах одного из факультетов университета, продемонстрировала свою эффективность, надежность и удобство в работе. По свидетельству заведующих кафедрами, им удалось с помощью данной программы

выполнить расчёт нагрузки за один день. Новизна и значимость разработки заключается в том, что она внесла еще один вклад в общее развитие данной темы, что подтверждено практическими результатами ее использования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программное средство расчета педагогической нагрузки ВУЗа на основе анализа и оптимизации учебных планов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022617833 / К. Н. Киселев, М. В. Митрофанов, В. Ф. Самохин, А. С. Пермяков. – Оpubл. 26.04.2022.
2. Информационная система «НАГРУЗКА-ВУЗ»: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016613370 / Е. В. Пучков, В. А. Алексеев. – Оpubл. 24.03.2016.
3. Информационная система «УМУ ШТАТЫ»: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020662648 / Л. А. Павлов, А. А. Андреева, Н. В. Перлова. – Оpubл. 16.10.2020.
4. Единая информационная среда учебного процесса: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2016611604 / А. В. Лукичев. – Оpubл. 05.02.2016.
5. **Горский, А. В.** Разработка модуля формирования учебных поручений в ВУЗе / А. В. Горский, К. Н. Фадеева // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. – 2023. – № 9. – С. 23–28.
6. **Нестерова, Н. С.** Система электронного документооборота кафедры ВУЗа / Н. С. Нестерова, Н. А. Новикова // Политематический сетевой электронный науч. журн. Кубанского гос. аграрного ун-та. – 2015. – № 110. – С. 329–338.
7. Интеграция задач управления учебным процессом ВУЗа / Н. Н. Клеванский [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 8. – С. 44–50.
8. **Шамсутдинова, Т. М.** Проблемы автоматизации расчета и распределения учебной нагрузки преподавателей ВУЗов // Новые технологии в науке, образовании, производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 518–522.
9. **Аштуева, А. С.** Расчет часов и распределение учебной нагрузки с использованием «1С: университет проф» / А. С. Аштуева, Н. В. Бендик // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы Всерос. студенч. науч.-практ. конф., Иркутск, 16–17 февр. 2023 г.: в 3 т. – Иркутск, 2023. – Т. 2. – С. 240–246.

Статья сдана в редакцию 23 мая 2024 года

Контакты:
shirsvet@tut.by (Широченко Виктор Александрович).

V. A. SHIROCHENKO

AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING, DISTRIBUTING AND ANALYZING ACADEMIC LOAD AT A UNIVERSITY DEPARTMENT

Abstract

The analysis of existing approaches and developments of software systems for calculating and distributing the academic load at HEI departments has been carried out. The process of preparing initial information and its processing has been studied. A software system with a user-friendly interface is proposed, which makes it possible to significantly increase the efficiency and quality of calculation and distribution of academic load between academic staff, as well as the control of its implementation.

Keywords:

automation, software system, academic load calculation, academic load distribution, monitoring of academic load implementation.

For citation:

Shirochenko, V. A. Automated system for calculating, distributing and analyzing academic load at a university department / V. A. Shirochenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 111–121.

Математика. Информатика

