

11
2025

Технология Металлов

11.2025

Ежемесячный производственный, научно-технический
и учебно-методический журнал

Издается с июля 1998 г.

Англоязычная версия журнала селективно выпускается в качестве приложения к журналу Russian Metallurgy (издательство Pleiades Publishing, Ltd. (США), а также в журнале Steel in Translation (издательство Allerton Press, Inc., входящее в группу компаний Pleiades Publishing, Ltd. (США)).

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Astrophysics Data System (ADS), ChemWeb, El-Compendex, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, OCLC, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions, Web of Science.

Главный редактор журнала

Рудской А.И., академик РАН

Зам. главного редактора

Баурова Н.И., д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Юсупов В.С., д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

Баннх О.А., академик РАН

Гречников Ф.В., академик РАН

Леонтьев Л.И., академик РАН

Счастливец В.М., академик РАН

Batako A., д-р фил. (Великобритания)

Дугин А.В., д-р фил. (Германия)

Михайлов С., д-р фил., проф. (Швейцария)

Попов А.В., д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Storchak M., д-р техн. наук (Германия)

Редакционная коллегия

Алещенко А.С., канд. техн. наук

Баннх И.О., д-р техн. наук

Баскаков В.Д., д-р техн. наук, проф.

Васильев В.А., д-р техн. наук, проф.

Воронцов А.Л., проф., д-р техн. наук

Галиновский А.Л., д-р техн. наук,

д-р пед. наук, проф.

Гугис Н.Н.

Дагман А.И., канд. техн. наук

Зимовец В.Г., канд. техн. наук

Зубков Н.Н., д-р техн. наук, проф.

Кожевникова И.А., д-р техн. наук

Колбасников Н.Г., д-р техн. наук,
проф.

Колесников А.Г., проф., д-р техн. наук

Колобов А.В., канд. техн. наук

Коновалов С.В., проф., д-р техн. наук

Курганова Ю.А., д-р техн. наук, проф.

Кушнарёв А.В., д-р техн. наук

Лещенко И.А., д-р техн. наук

Логунов А.В., д-р техн. наук, проф.

Мазур И.П., д-р техн. наук

Матюнин В.М., д-р техн. наук, проф.

Миляев И.М., д-р техн. наук

Мишнев П.А., канд. техн. наук

Нехамин С.М., д-р техн. наук, проф.

Осадчий В.Я., проф., д-р техн. наук

Попович А.А., д-р техн. наук, проф.

Пышминцев И.Ю., д-р техн. наук

Романцев Б.А., проф., д-р техн. наук

Сидельников С.Б., д-р техн. наук

Шаталов Р.Л., д-р техн. наук, проф.

Шварц Д.Л., канд. техн. наук

Руководители региональных центров

Поволжский региональный центр Тихонов А.К., д-р техн. наук

Челябинский региональный центр Ольховацкий А.К., канд. техн. наук

Белорусский республиканский центр Судник Л.В., д-р техн. наук

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели. При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал «Технология металлов» обязательна.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

Тел./факс: +7 (499) 988-98-65, тел.: +7 (499) 995-45-22.

<http://www.nait.ru>

e-mail: admin@nait.ru

© ООО «Наука и технологии», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Болдырев Д.А., Галушкин И.Г., Краснопевцев А.Ю. Исследование качества и особенностей структуры и свойств ремонтного соединения медных головок электрододержателей ЭДП. 2

ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВ

Воронцов А.Л., Рещиков Е.О. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Методики расчета технологических параметров выдавливания изделий с одинаковыми радиусами верхней и нижней частей. Ч. 5 12

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Слинко Д.Б., Денисов В.А., Чавдаров А.В. Технологии и оборудование для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин дуговой и плазменно-порошковой наплавкой 18

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Зайдес С.А., Ле Т.Т. Определение параметров деформирующего инструмента для строчного поверхностного пластического деформирования 24

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Зверовщиков В.З. Контактное взаимодействие уплотненного шлифовального материала с поверхностью детали при финишной абразивной обработке. 37

Исследование качества и особенностей структуры и свойств ремонтного соединения медных головок электрододержателей ЭДП

Д.А. БОЛДЫРЕВ*, д-р техн. наук, проф., И.Г. ГАЛУШКИН, магистр,
А.Ю. КРАСНОПЕВЦЕВ, канд. техн. наук, доц.

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти,
Самарская обл., 445020, Российская Федерация

*E-mail: Denis.Boldyrev@vaz.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-11-2-11

Статья поступила в редакцию 29.05.2025

Принята после доработки 07.07.2025

Принята к публикации 06.08.2025

Анализ полученных данных о структуре и свойствах соединений медных элементов электрододержателей ЭДП показал отсутствие трещин и превышение допустимого уровня пустот в материале шва, что свидетельствует о приемлемом уровне качества. Прямолинейная форма соединения указывает на умеренный уровень напряжений и подтверждает корректность выбранных настроек процесса. Характеристика микро- и макроструктуры области соединения свидетельствует о такой разновидности процесса, как «пайкосварка». Небольшие дефекты диаметром менее 10 микрон незначительно влияют на прочность сварных соединений, что подтверждают испытания образцов на одноосное растяжение. Проведенные механические тесты свидетельствуют о способности соединения выдерживать установленные нормативные нагрузки, причем показатели прочности полностью удовлетворяют НД как для основного материала, так и для соединения.

Ключевые слова: головка электрододержателя электродуговой печи, восстановление, медь, особенности структуры и качества соединения.

В чугунолитейных производствах, использующих электродуговые печи (ЭДП) для выплавки чугуна, существует серьезная и актуальная производственная проблема — прогорание медных головок электрододержателей. Это явление приводит к существенным простоям технологического

процесса, поскольку замена поврежденных головок может занимать до 72 ч, что негативно сказывается на объеме выпуска продукции и, как следствие, на прибыли предприятия. Изготовление новых медных головок электрододержателей, в свою очередь, требует значительных финансовых затрат

на закупку материалов и оплату труда специалистов. В связи с этим поиск эффективных и экономически обоснованных методов решения данной проблемы является первоочередной задачей для многих металлургических предприятий. Наиболее рациональным техническим решением, зарекомендовавшим себя на практике, является восстановление медных головок электрододержателей ЭДП путем их заплавления медным электродом «Комсомолец-100». В быту этот процесс часто называют сваркой, однако более точное определение требует уточнения технологических особенностей. Известно, что при использовании электродов «Комсомолец-100» состав наплавленного слоя, формирующегося в процессе заплавления, подвержен влиянию различных факторов, включая взаимодействие с покрытием электрода. В данном покрытии марганец и кремний, вступая в реакцию с металлом основы, приводят к образованию сплава с температурой плавления ниже, чем у чистой технической меди, используемой для изготовления головок электрододержателей. В зависимости от расходуемой сварочной мощности и технологических параметров процесс мо-

жет быть классифицирован либо как сварка, либо как пайка. Важно понимать, что при высокой мощности и глубоком проплавлении речь идет о сварке, а при меньшей мощности и соединении по поверхности раздела — о пайке. В данной работе представлены результаты сопутствующего исследования, направленного на обеспечение гарантированной работоспособности восстановленного узла. Исследование было проведено с целью детального изучения качества, особенностей структуры и свойств соединения, полученного в результате заплавления. Сущность реализованного технического решения заключается в следующем: место прогорания медной головки электрододержателя засыпается рубленной медной крошкой диаметром до 0,5 мм и длиной от 2 до 5 мм. Данная крошка обеспечивает дополнительный объем металла для формирования прочного и надежного соединения. Затем, с использованием сварочного аппарата ВД-300, производится предварительный прогрев зоны заплавления электродом «Комсомолец-100». После прогрева в разделку кромок электродом последовательно укладываются слои шва. Важным аспектом является то, что в состав шва за счет перемешивания в жидком состоянии также входит медная крошка, обеспечивая однородность структуры и улучшая механические свойства соединения. Металл электрода полностью заполняет завариваемое отверстие, формируя монолитную структуру. Для всестороннего исследования качества и особенностей структуры и свойств ремонтного соединения медных головок электрододержателей ЭДП был изготовлен натурный образец. Образец был получен путем вырезки на ленточнопильном отрезном станке модели 8531 (рис. 1) фрагмента, состоящего из двух медных пластин, соединенных между собой методом заплавления, описанным выше. Данный образец позволяет проводить различные испытания, включая механические и металлографические, для оценки прочности, плас-

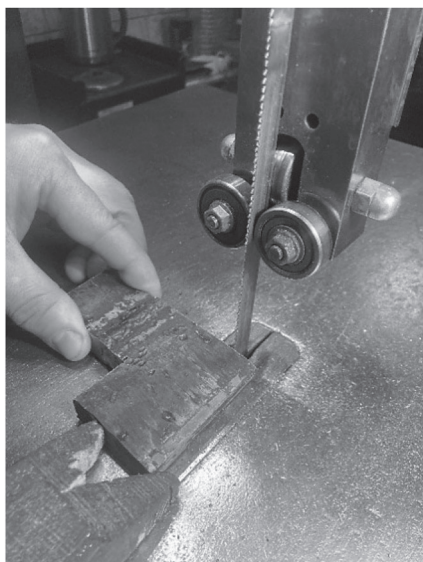


Рис. 1. Вырезка фрагмента на ленточнопильном отрезном станке модели 8531



Рис. 2. Образец из соединения головки электродержателя ЭДП

тичности и микроструктуры соединения. Полученные данные будут использованы для оптимизации технологического процесса восстановления медных головок электродержателей ЭДП и повышения их долговечности в условиях эксплуатации. Область наплавленного металла представляет собой ровную, непрерывную линию, проходящую вдоль всей длины образца. Толщина металла составляет приблизительно 10 мм, при этом шов характеризуется небольшим усилением в 1 мм, обеспечивающим его плотное, равномерное прилегание к основной поверхности. Поверхность шва отличается исключительной гладкостью и однородностью, не содержит видимых дефектов, таких как поры, трещины или непровары, и имеет характерный блеск, типичный для высококачественных медных сплавов. В непосредственной близости от зоны шва наблюдается сажастый налет, образовавшийся в процессе термического воздействия и последующего окисления, что зафиксировано на рис. 2. Для точного определения химического состава как основного металла, так и зоны шва использовался современный оптико-эмиссионный спектрометр *Belec Vario Lab* производства Германии (рис. 3), обеспечивающий высокую точность и воспроизводимость результатов анализа. Подготовка образцов к испытаниям на одноосное растяжение



Рис. 3. Спектрометр *Belec Vario Lab*

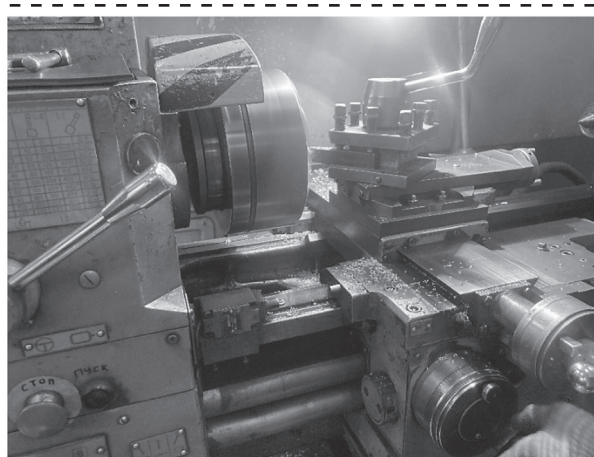


Рис. 4. Токарный станок модели 16Б16КП

осуществлялась с использованием токарного станка модели 16Б16КП (рис. 4), что позволило получить образцы с точными геометрическими параметрами, необходимыми для проведения испытаний в соответствии с нормативной документацией. Процедура определения механических свойств при одноосном растяжении проводилась в строгом соответствии с требованиями ГОСТ 1497—84 (рис. 5, 6), что гарантирует достоверность и сопоставимость полученных данных. Для последующего исследования микроструктуры были отобраны два фрагмента: один —

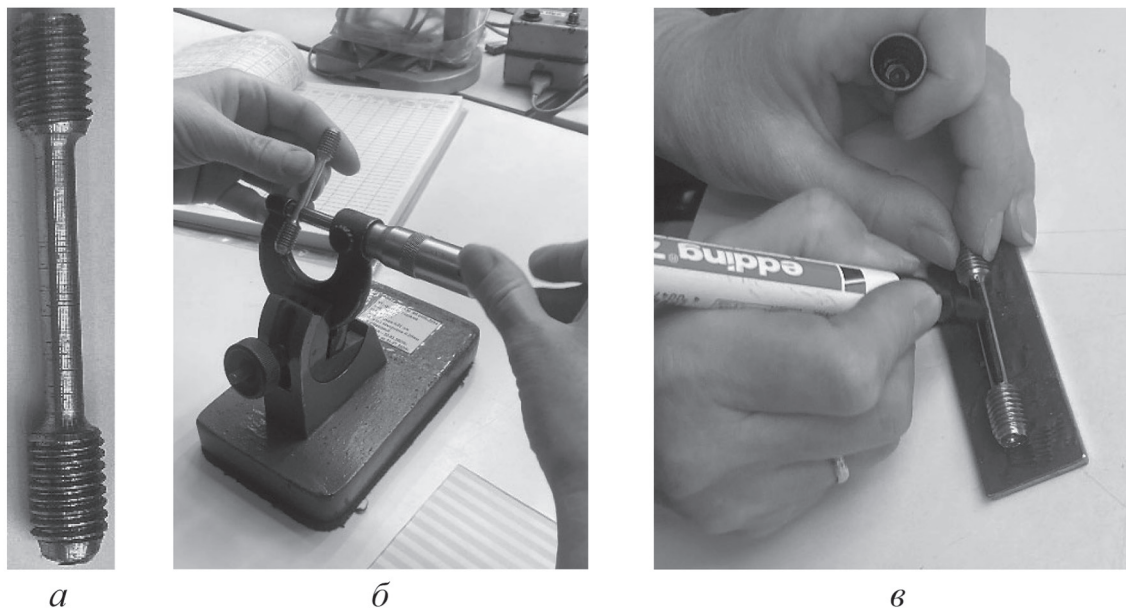


Рис. 5. Образец для испытаний на одноосное растяжение (а); замер диаметра образца (б); обозначение рабочей зоны образца (в)

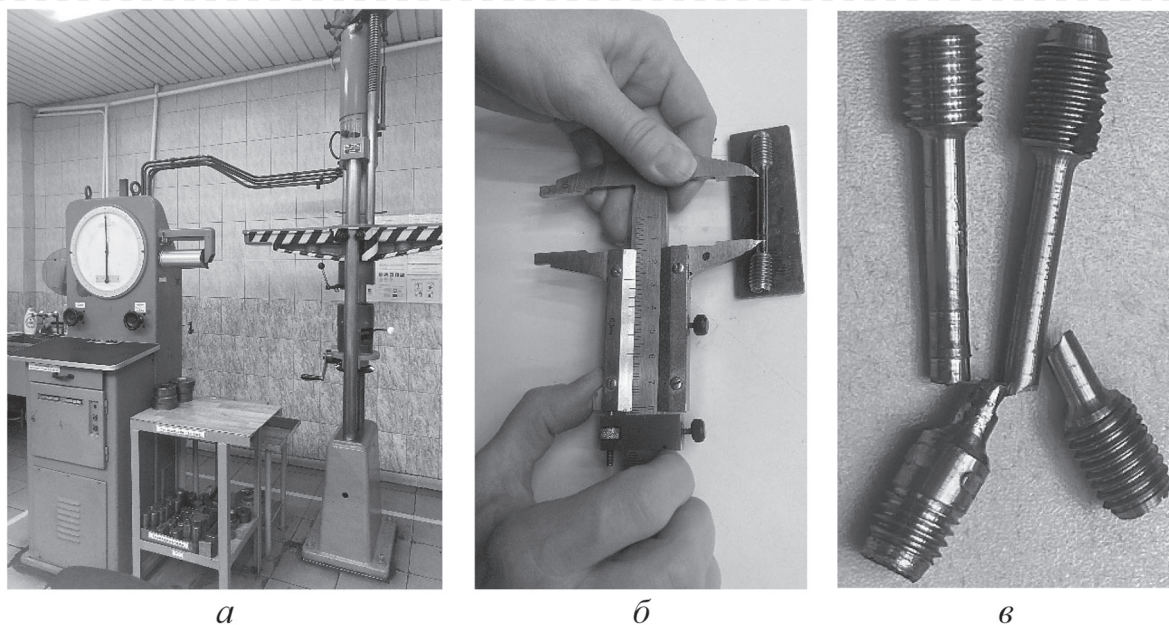


Рис. 6. Испытательная машина *Amsler* модели 20SZBDA (а); определение конечной длины образца (б); образцы после разрыва (в)

из основного материала, другой — из зоны соединения, что позволило провести сравнительный анализ структуры и выявить возможные изменения, вызванные процессом сварки. Шлифовка образцов выполнялась на автоматизированном шлифовально-по-

лировальном станке *LaboForce-50* производства датской компании *Struers* (рис. 7, а), обеспечивающем равномерное удаление поверхностных дефектов и создание ровной поверхности для последующей полировки. Полировка осуществлялась с использова-

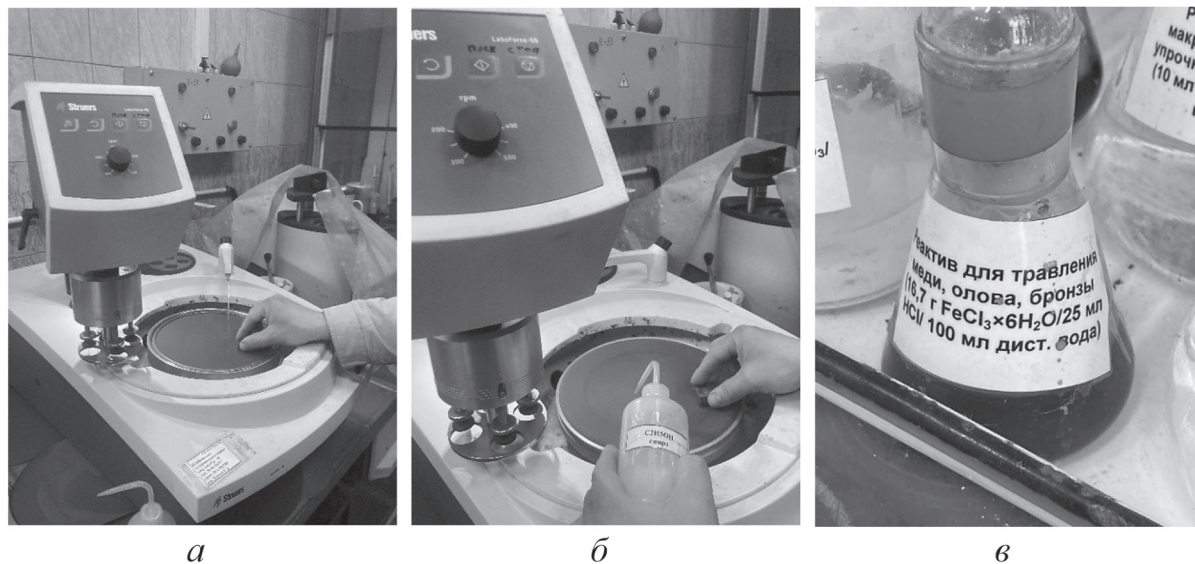


Рис. 7. Полировка на шлифовально-полировальном станке *LaboForce-50* (а); шлифовка (б); реактив для травления (в)

нием алмазной пасты АМС 1.0 в сочетании со спиртом в качестве смазывающей жидкости (рис. 7, б), что позволило достичь зеркальной поверхности, необходимой для детального исследования микроструктуры. После предварительного исследования микроструктуры образцов в нетравленном состоянии для оценки содержания неметаллических включений, таких как оксиды и сульфиды, поверхность подвергалась травлению. В качестве травителя использовался водный раствор, приготовленный из хлористого шестиводного железа ($16,7 \text{ г FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и соляной кислоты (25 мл HCl), разбавленных в 100 мл дистиллированной воды (рис. 7, в).



Рис. 8. Металлографический микроскоп *OLIMPUS GX41*

Для анализа микроструктуры применялся высококачественный инвертированный металлографический микроскоп *OLIMPUS GX 41* (рис. 8), оснащенный современным анализатором изображений *Siams 700*, позволяющим проводить количественный анализ микроструктуры и выявлять мельчайшие дефекты. Внешний вид образца после полировки представлен на рис. 9. На фрагменте шов отчетливо просматривался благодаря заметному отличию по цвету от основного металла: шов имел более серый оттенок, что

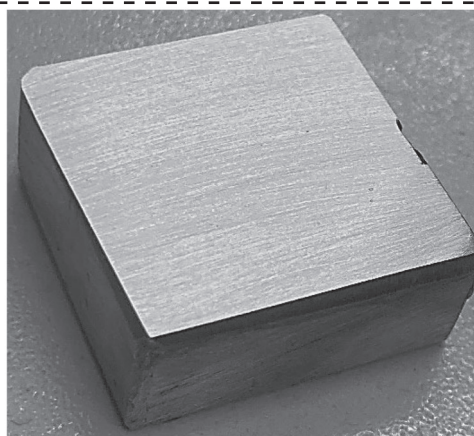


Рис. 9. Внешний вид образца сварного шва (после полировки)

обусловлено изменением химического состава и микроструктуры в зоне соединения. Визуально металл образца выглядит плотным, однородным и не содержит видимых дефектов, таких как трещины или раковины, что свидетельствует о высоком качестве выполненного заполнения. Химический состав основного материала и зоны шва подробно представлен в табл. 1. Метод анализа соответствовал требованиям ГОСТ 9717—82, а метод подготовки образцов — ГОСТ 7565—81, что обеспечивает надежность и сопоставимость полученных результатов. Из табл. 2 видно, что механические свойства образцов как зоны соединения, так и основного металла соответствуют требованиям нормативной документации (НД). Микроструктура исследуемых образцов представлена на рис. 10—13.

Анализ результатов химического состава основного металла показал, что его состав соответствует марке меди М1(М1р) по ГОСТ 859—2014, что подтверждается содержанием основных элементов: меди не менее 99,9%, кремния не более 0,12%, марганца не более 0,005%, железа не более 0,004%, цинка не более 0,005%, свинца не более 0,0005%. Состав шва, полученного методом ручной

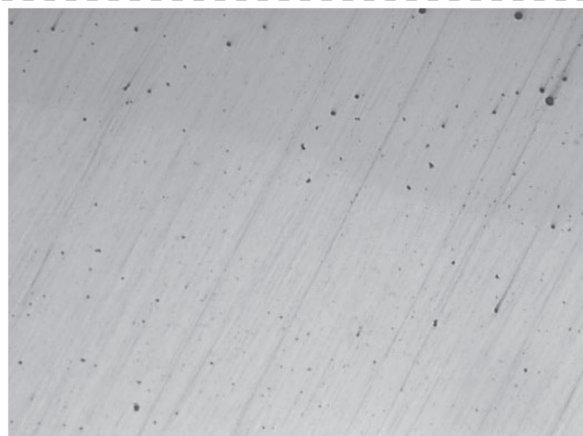
дуговой сварки, существенно отличается как от состава основного металла, так и от состава используемого электрода марки «Комсомолец-100» (ГОСТ 10121—88), что обусловлено процессом расплавления и смешивания металлов. Несмотря на преднамеренное разбавление расплава медной крошкой, направленное на снижение усадочных напряжений и повышение пластичности шва, концентрация меди в шве, как было установлено, оказалась ниже, чем в основном металле. Это может быть связано с более интенсивным окислением меди при высоких температурах заплавления и последующим удалением оксидов в шлак. Разрушение образца, содержащего соединение, при одноосном растяжении произошло не в зоне шва, что является крайне положительным фактором и характеризует высокое качество выполненного соединения. Это свидетельствует о том, что зона шва обладает достаточной прочностью и пластичностью, чтобы выдерживать приложенные нагрузки до момента достижения предельной прочности основного металла. Результаты определения механических свойств соединения, включая предел прочности, предел текучести и относительное удлинение, приведе-

1. Результаты анализа химического состава

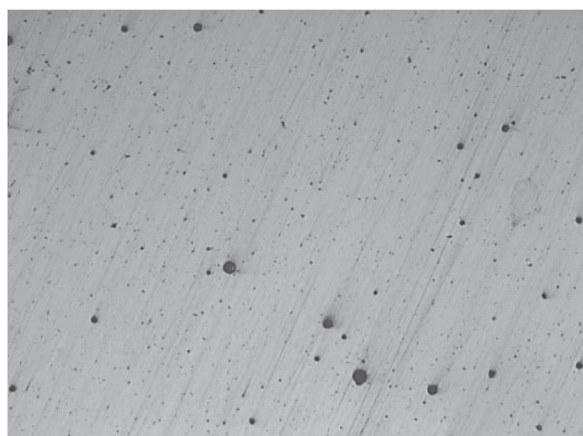
Место отбора образца	Определяемые элементы, % (мас.)					
	Cu	Zn	Al	Fe	Mn	Si
Основной металл	99,91	0,032	0,002	0,046	—	—
Шов	94,81	0,019	—	2,400	1,75	0,80

2. Результаты определения механических свойств сварного соединения

Показатель, НД на метод	НД на материал, состояние материала, нормативные значения	Результат	
		В зоне сварного шва	В основном металле
Твердость, НВ, ГОСТ 9012	ГОСТ 1535, полутвердое состояние, не менее 60	87	62
Предел прочности на растяжение, МПа, ГОСТ 1497	ГОСТ 1173—06 Ленты медные: полутвердое состояние, 250—310 МПа	250	270
Относительное удлинение, %, ГОСТ 1497	ГОСТ 1173—06 Ленты медные: полутвердое состояние, не менее 15%	15	18

*а**б***Рис. 10. Микроструктура переходной зоны при увеличении $\times 100$:**

а — в нетравленном виде; *б* — после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

*а**б***Рис. 11. Микроструктура металла шва при увеличении $\times 100$:**

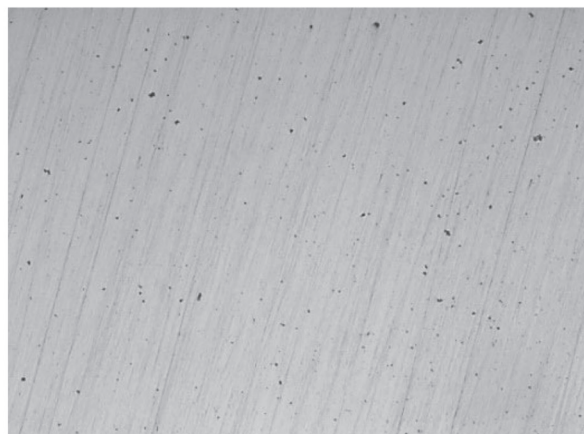
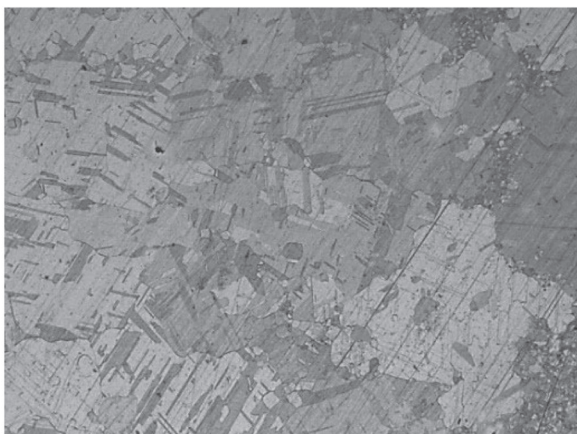
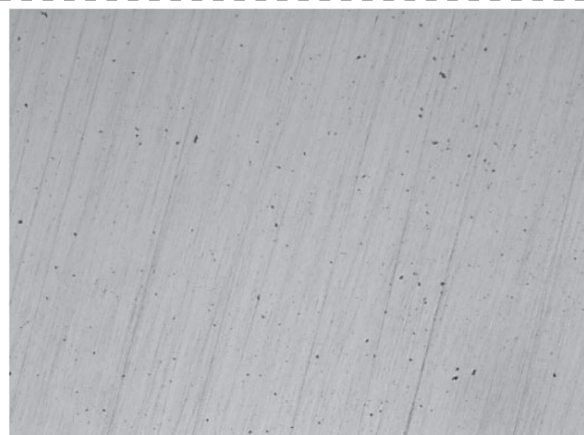
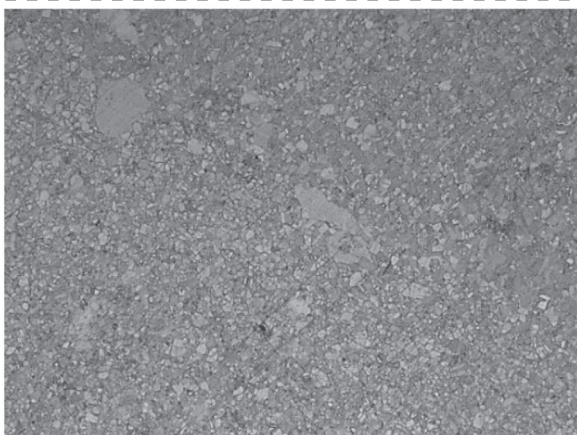
а — в нетравленном виде; *б* — после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

ны в табл. 2, где зафиксированы значения, превышающие минимально допустимые значения, установленные для меди марки М1(М1р). Анализ полученных микроснимков различных зон исследуемого материала, выполненный с использованием оптической металлографии, позволяет сделать следующие заключения:

- в переходной зоне металл шва плотно контактирует с основным металлом, обеспечивая непрерывность структуры и минимизацию концентрации напряжений. При этом структура металла шва, характеризующаяся

более крупнозернистой структурой, отличается от структуры основного материала, представляющей собой мелкозернистую полиэдрическую структуру (см. рис. 10). Разница в структуре обусловлена различными скоростями охлаждения и условиями кристаллизации в зоне шва и основном металле;

- структура шва преимущественно зернистая, с увеличением величины зерна от периферии к центру. Встречаются единичные поры, размером порядка 10 мкм, что допустимо в соответствии с требованиями


a

б
Рис. 12. Микроструктура металла зоны термического влияния при увеличении $\times 100$:
a — в нетравленном виде; *б* — после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

a

б
Рис. 13. Микроструктура основного металла при увеличении $\times 100$:
a — в нетравленном виде; *б* — после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

ГОСТ 30242—97, регламентирующего допустимые дефекты в металлах и сплавах. Зона термического влияния, в которой металл затвердевает в форме кристаллов с измененной ориентацией, не выявлена (ГОСТ Р ИСО 17677-1—2023), что указывает на отсутствие значительного термического воздействия на основной металл вблизи зоны шва. Скопления пор и трещины отсутствуют (см. рис. 11), что является важным показателем качества соединения и свидетельствует о соблюдении технологических параметров заправки. Вероятно, в процессе кристал-

лизации шва происходит выделение растворенного водорода, вызвавшего образование пор от водяных паров, появившихся в металле шва в результате реакции водорода с кислородом окиси меди. Данная реакция может быть представлена следующим уравнением: $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{Cu}$. Водяные пары, накапливаясь в микропустотах шва, создают в нем разрушающее металл давление, образуя микротрещины. Это явление носит название водородной болезни меди и может быть минимизировано путем тщательной подготовки поверхности сваривае-

мых деталей, использования защитных газов и контроля влажности окружающей среды. Низкая стойкость меди и ее сплавов против порообразования в сварных швах в общем случае связана с активным взаимодействием меди с водородом и протеканием при этом сопутствующих процессов (образование водяных паров, выделение водорода) [1];

- в зоне термического влияния имеет место рекристаллизация меди: образование крупных зерен из-за воздействия высоких температур, а также наблюдается двойникование зерен (см. рис. 12). Данный процесс приводит к изменению механических свойств металла в зоне термического влияния, снижая его прочность, но повышая пластичность. Возникновение двойников отжига в данном случае объясняется термическим воздействием до температур рекристаллизационного отжига и низкой энергией дефектов упаковки, свойственной меди [2–4]. Двойники отжига являются результатом пластической деформации кристаллической решетки под воздействием температуры и способствуют снижению внутреннего напряжения в материале. Структура основного металла — полиэдрическая мелкозернистая (см. рис. 13), что обеспечивает высокую прочность и пластичность материала. Мелкозернистая структура препятствует развитию трещин и повышает сопротивление материала к усталостному разрушению.

Визуальный осмотр не выявил трещин и критического уровня пористости, что является важным показателем качества выполненного соединения. Прямолинейный профиль шва свидетельствует о невысоком уровне напряжений и, следовательно, правильном выборе параметров заправки, таких как сила тока, напряжение дуги и скорость сварки. Особенности микроструктуры в зоне соединения указывают на такую разновидность процесса, как пайкосварка (в соответствии с ГОСТ 17325—79 — некапиллярная пайка, при которой соединяемым

кромкам заготовок придается форма, подобно разделке кромок при сварке плавлением) с введением наполнителя (медной крошки).

Наличие единичных пор размером до 10 мкм не оказывает значительного влияния на прочностные характеристики соединения, что подтверждается результатами испытаний образцов на одноосное растяжение. Выполненные механические испытания указывают на то, что соединение способно выдерживать регламентированные нормативными документами нагрузки, а прочностные характеристики полностью соответствуют требованиям, предъявляемым как к основному материалу М1(М1р), так и к шву, выполненному электродом марки «Комсомолец-100».

Как показывает эксплуатация, ресурс работы головки электрододержателя до следующего ремонта увеличивается в 1,5—1,8 раза (1,5 года при исходном ресурсе — от 10 месяцев до 1 года), что свидетельствует о повышении эффективности и долговечности используемого оборудования благодаря оптимизации технологического процесса сварки.

Выводы

1. Анализ полученных данных, включающих в себя детальное исследование структуры и свойств соединений медных элементов электрододержателей ЭДП, не выявил существенных отклонений от установленных стандартов качества. В частности, микроскопическое исследование не обнаружило наличия трещин, которые могли бы указывать на дефекты в структуре материала. Кроме того, анализ пористости сварного шва показал, что содержание пустот находится ниже допустимого уровня, регламентированного соответствующими нормативными документами. Это обстоятельство является важным индикатором надежности и долговечности соединения.

2. Геометрическая форма соединения, характеризующаяся высокой прямолиней-

ностью, свидетельствует о равномерном распределении напряжений в области сварки. Это, в свою очередь, указывает на корректность выбранных параметров процесса сварки: тока, напряжения, скорости перемещения электрода и других технологических факторов. Отклонения от прямолинейности незначительны и не оказывают существенного влияния на общие характеристики соединения.

3. Характеристика микро- и макроструктуры области соединения, полученная с использованием металлографических методов, позволяет классифицировать данный процесс как «пайкосварку». Это означает, что при формировании соединения использовался процесс, сочетающий в себе элементы пайки и сварки, что обеспечивает высокую пластичность и хорошую смачиваемость поверхностей. В микроструктуре наблюдается мелкозернистая структура, что положительно сказывается на механических свойствах соединения.

4. Незначительные дефекты, такие как поры или неметаллические включения, диаметром менее 10 микрометров, были обнаружены в ограниченном количестве. Однако следует отметить, что их влияние на общую прочность соединений минимально. Это подтверждается результатами испытаний образцов на одноосное растяжение, в ходе которых соединения продемонстрировали высокую устойчивость к разрушению при приложении нагрузки. В частности, при испытаниях на растяжение наблюдалось равномерное увеличение деформации до момента разрушения, без признаков хрупкого разрушения.

5. Проведенные комплексные механические тесты свидетельствуют о способности соединения выдерживать установленные нормативные нагрузки, соответствующие требованиям действующих нормативно-технических документов. Показатели прочности, такие как предел прочности при растяжении, предел текучести и относительное удлинение, полностью удовлетворяют требованиям НД как для основного материала электрододержателя (медь), так и для соединения. Это подтверждает высокую технологическую эффективность применяемого метода получения неразъемного соединения и обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации электрододержателей ЭДП.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. https://de.donstu.ru/CDOCourses/structure/mash_stroit_tech/masp/311/626.
2. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
3. <https://studfile.net/preview/6141410/page:9/>.
4. Конькова Т.Н., Миронов С.Ю., Корзников А.В., Мышляев М.М. Влияние низкотемпературного отжига на микроструктуру криогенно деформированной меди // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. Вып. 2. С. 235—241.

Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Методики расчета технологических параметров выдавливания изделий с одинаковыми радиусами верхней и нижней частей. Ч. 5

А.Л. ВОРОНЦОВ*, д-р техн. наук, проф., Е.О. РЕЩИКОВ, преп.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Баумана)», Москва, 105005, Российская Федерация

*E-mail: mt13@bmstu.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-11-12-17

Статья поступила в редакцию 28.12.2023

Принята после доработки 31.01.2024

Принята к публикации 05.06.2024

Изложены научно обоснованные методики расчета основных технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки с целью получения изделий с одинаковыми радиусами верхней и нижней частей. Приведены все формулы, необходимые для определения силы процесса, максимальных напряжений, действующих на различные формообразующие элементы штампа, определения накопленных деформаций в любых точках получаемого изделия, а также учета упрочнения выдавливаемого материала.

Ключевые слова: объемная штамповка, радиальное выдавливание, напряжения, деформации, трубная заготовка.

Выполненный в работах [1–4] теоретический анализ позволяет предложить для практического использования следующую научно обоснованную методику расчета основных технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки.

Основными данными для расчета являются предел текучести σ_{s0} и истинная кривая упрочнения штампуемого материала (либо аппроксимация этой кривой [5–9], по которой можно найти предел текучести σ_{s0} при $e_i = 0$), коэффициенты трения μ , μ_1 , μ_2 (в большинстве случаев их следует при-

нимать равными друг другу), размеры изделия R, r, r_0, h, H , а также радиусы наружной и внутренней поверхностей заготовки R_3, r_3 , обеспечивающие технологические зазоры относительно R и r для свободной загрузки заготовки в полость штампа (рис. 17).

В случае горячего выдавливания или если выдавливаемый материал при комнатной температуре является неупрочняющимся и характеризуется постоянным напряжением текучести, равным пределу текучести, то есть $\sigma_s = \sigma_{sh} = \sigma_{s0}$, можно пропустить пункты 3, 4 и сразу перейти к пункту 5, а затем пропустить пункты 6—14 и перейти к пункту 15.

А для упрочняющегося материала расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Определяется величина рабочего хода выдавливания поперечного выступа:

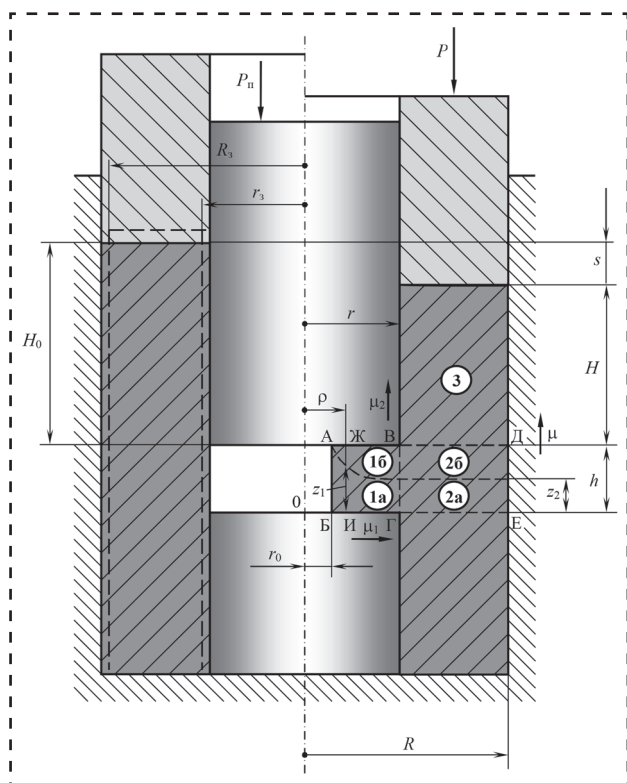


Рис. 17. Расчетная схема радиального выдавливания трубных изделий с внутренним выступом

$$s = \frac{r^2 - r_0^2}{R^2 - r^2} h. \quad (155)$$

2. Вычисляется начальная высота выдавливаемой части стенки:

$$H_0 = H + s. \quad (156)$$

3. Вычисляется деформация, накопленная при осадке заготовки в пределах исходных технологических зазоров:

$$e_{i0} = \ln \frac{R^2 - r^2}{R_3^2 - r_3^2}. \quad (157)$$

4. При необходимости определения силы начала выдавливания для вычисленного значения e_{i0} по кривой упрочнения или ее аппроксимации находится напряжение текучести σ_{sh} , которое в результате осадки будет иметь материал заготовки в момент начала выдавливания.

5. При необходимости вычисляется сила начала выдавливания:

$$P_0 = 3,456 \sigma_{sh} (R^2 - r^2) \times \left[1 + \frac{0,275 R^2}{r^2} + 2 \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{sh}} H_0 \frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + r \left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75 R^4 + R^2 r^2 - 0,25 r^4 \right) + \frac{h (R^2 - r^2)^2}{0,551 R^2 \ln \frac{R}{r}} \right] \quad (158)$$

6. Вычисляется вспомогательная величина:

$$n = \frac{s}{h}. \quad (159)$$

7. Находится осевая координата границы между зонами 2а и 2б:

$$z_2 = h e^{-n}. \quad (160)$$

8. Определяется накопленная деформация в зоне 2а, которая будет одинаковой в любой точке этой зоны:

$$e_{2a} = 0,55 \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) n. \quad (161)$$

При этом накопленная деформация $e_{вд} = 0$ в любой точке верхней границы ВД зоны **2б**. При необходимости построения эпюры по высоте зоны **2б** с достаточной точностью можно соединить прямой линией нулевое значение на верхней границе этой зоны с величиной e_{2a} на нижней границе.

Следует напомнить, что распределение накопленных деформаций в зонах **2а** и **2б** от радиуса ρ не зависит, то есть, например, эпюры накопленных деформаций вдоль линий ВГ и ДЕ будут одинаковыми.

9. Вычисляется накопленная деформация при $\rho = r_0$, то есть на линии АБ, которая будет одинаковой по всей высоте боковой поверхности выдавленного поперечного выступа:

$$e_{r_0} = 1,155 \ln \frac{r}{r_0}. \quad (162)$$

10. При необходимости осевая координата z_1 границы между зонами **1а** и **1б** для любого радиуса ρ определяется с помощью выражений:

$$n_2 = \frac{\rho^2 - r_0^2}{R^2 - r^2}, \quad (163)$$

$$z_1 = h e^{-n_2}. \quad (164)$$

11. При необходимости накопленная деформация в произвольной точке Ж определяется по формуле:

$$e_{ж} = 1,155 \ln \frac{r}{\rho}. \quad (165)$$

12. При необходимости накопленная деформация в произвольной точке И определяется по формуле:

$$e_{и} = e_{ж} + 0,55 \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) n_2. \quad (166)$$

Эта деформация будет постоянна по всей высоте z_1 . При необходимости построения эпюры по высоте зоны **1б** с достаточной точностью можно соединить прямой линией значение $e_{ж}$ на верхней границе этой зоны с величиной $e_{и}$ на нижней границе.

13. Вычисляется средняя накопленная деформация в области **2**, включающей зоны **2а** и **2б**:

$$e_2 = 0,275 n \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) (1 + e^{-n}). \quad (167)$$

14. Определяется средняя накопленная деформация во всем очаге пластической деформации:

$$e_i = \frac{e_{r_0}(r^2 + rr_0 - 2r_0^2) + e_2(3R^2 - r^2 - rr_0 - r_0^2)}{3(R^2 - r_0^2)} + e_{i0}. \quad (168)$$

Найденная величина накопленной деформации e_i при выдавливании упрочняющегося материала позволяет по кривой упрочнения или ее аппроксимации определить соответствующую величину напряжения текучести σ_s .

15. Вычисляется сила окончания выдавливания, которая является максимальной и определяет выбор нужного пресса:

$$P = 3,456 \sigma_s (R^2 - r^2) \left[1 + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} + \frac{0,275 R^2}{r^2} + 2 \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} H \frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + \frac{r \left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75 R^4 + R^2 r^2 - 0,25 r^4 \right)}{h(R^2 - r^2)^2} - \frac{0,551 R^2}{R^2 - r^2} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (169)$$

16. Вычисляется удельная деформирующая сила, знание которой необходимо для оценки прочности кольцевого пуансона и выбора материала для его изготовления:

$$q = \frac{P}{3,142(R^2 - r^2)}. \quad (170)$$

17. Вычисляется максимальное давление на стенку матрицы, знание которого необходимо для выбора материала матрицы, ее толщины, а также решения вопроса о необходимости бандажирования и выбора количества бандажей [9]:

$$p = 1,1\sigma_s \left\{ \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \times \left[\frac{h^2}{4} - \frac{R^2 - r^2}{2} + R^2 \ln \frac{R}{r} \right] + 0,275 \left[\left(\frac{R}{r} \right)^2 - 1 \right] + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} \right\}. \quad (171)$$

18. Вычисляется сила прижима, необходимая для удержания верхней оправки в заданном положении:

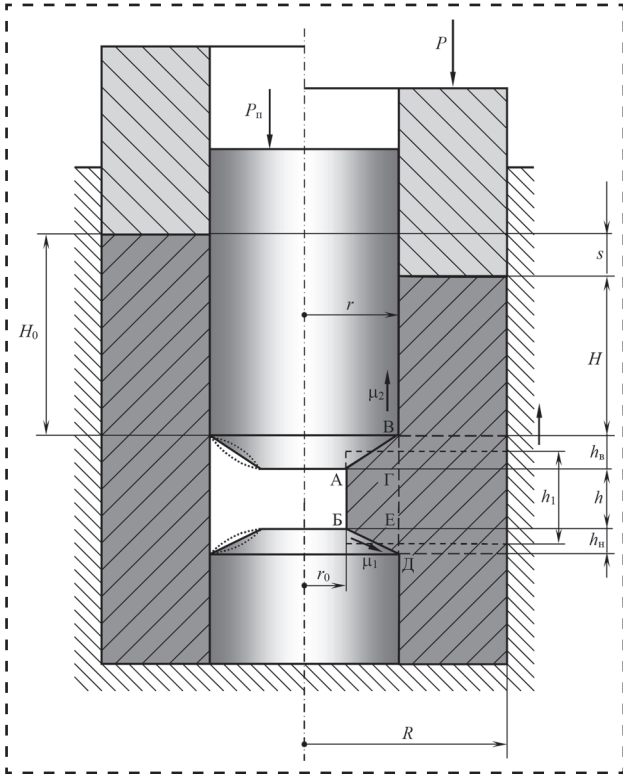


Рис. 18. Расчетная схема радиального выдавливания трубных изделий с внутренним выступом, ограниченном коническими поверхностями

$$P_n = 3,456\sigma_s \left[0,5 \left(1 - \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) (r^2 - r_0^2) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) r^2 \ln \frac{r}{r_0} - 2 \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} r H \mu_2 \right]. \quad (172)$$

Если при расчете по формуле (172) получается $P_n \leq 0$, то это означает, что для прижима достаточно трения выдавливаемого металла об оправку, определяемого коэффициентом трения μ_2 . В этом случае следует принимать $P_n = 0$.

Важно указать, что внутренним радиальным выдавливанием можно получать изделия более сложной формы, чем показанная на рис. 17. Примеры таких изделий ранее были представлены на рис. 13 работы [1].

Изложим методики технологических расчетов в таких случаях.

Сначала рассмотрим изделие, показанное на рис. 18, у которого выдавливаемый выступ имеет не цилиндрическую форму, а форму, ограниченную коническими поверхностями или иными, близкими к ним, например, выпуклыми или вогнутыми сферическими поверхностями (показаны точечными линиями в левой части рис. 18). Все данные случаи выдавливания, включая частные случаи, когда верхняя или нижняя поверхность выступа является плоской (то есть либо $h_b = 0$, либо $h_n = 0$), рассчитываются по следующей методике.

При отсутствии упрочнения выдавливаемого материала пункты 3, 4, 6–10 следует пропустить, используя в расчетах $\sigma_s = \sigma_{сн} = \sigma_{s0}$.

1. Определяется величина рабочего хода выдавливания поперечного выступа:

$$s = \frac{\frac{1}{3}(h_b + h_n)(2r^2 - r_0^2 - rr_0) + h(r^2 - r_0^2)}{R^2 - r^2}. \quad (173)$$

2. Вычисляется начальная высота выдавливаемой части стенки:

$$H_0 = H + s. \quad (174)$$

3. Вычисляется деформация, накопленная при осадке заготовки в пределах исходных технологических зазоров:

$$e_{i0} = \ln \frac{R^2 - r^2}{R_3^2 - r_3^2}. \quad (175)$$

4. При необходимости определения силы начала выдавливания для вычисленного значения e_{i0} по кривой упрочнения или ее аппроксимации находится напряжение текучести $\sigma_{ш}$, которое в результате осадки будет иметь материал заготовки в момент начала выдавливания.

5. При необходимости вычисляется сила начала выдавливания:

$$P_0 = 3,456\sigma_{ш}(R^2 - r^2) \times \left[1 + \frac{0,275R^2}{r^2} + 2\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{ш}}H_0\frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + \frac{r\left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75R^4 + R^2 r^2 - 0,25r^4\right)}{(h_b + h_{ш} + h)(R^2 - r^2)^2} - \frac{0,551R^2}{R^2 - r^2} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (176)$$

6. Из условия равенства объема заданного профилированного выступа условному цилиндрическому выступу высотой h_1 (рис. 18) находится эквивалентная высота для расчета накопленных деформаций:

$$h_1 = h + \frac{(h_b + h_{ш})(2r^2 - r_0^2 - rr_0)}{3(r^2 - r_0^2)}. \quad (177)$$

7. Вычисляется вспомогательная величина:

$$n = \frac{s}{h_1}. \quad (178)$$

8. Вычисляется накопленная деформация при $\rho = r_0$:

$$e_{r0} = 1,155 \ln \frac{r}{r_0}. \quad (179)$$

9. Вычисляется средняя накопленная деформация в периферийной области 2:

$$e_2 = 0,275n \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) (1 + e^{-n}). \quad (180)$$

10. Определяется средняя накопленная деформация во всем очаге пластической деформации:

$$e_i = \frac{e_{r0}(r^2 + rr_0 - 2r_0^2) + e_2(3R^2 - r^2 - rr_0 - r_0^2)}{3(R^2 - r_0^2)} + e_{i0}. \quad (181)$$

Найденная величина накопленной деформации e_i при выдавливании упрочняющегося материала позволяет по кривой упрочнения или ее аппроксимации определить соответствующую величину напряжения текучести σ_s .

11. Вычисляется сила окончания выдавливания, которая является максимальной и определяет выбор нужного пресса:

$$P = 3,456\sigma_s(R^2 - r^2) \left[1 + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} + \frac{0,275R^2}{r^2} + 2\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s}H\frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + \frac{r\left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75R^4 + R^2 r^2 - 0,25r^4\right)}{h(R^2 - r^2)^2} - \frac{0,551R^2}{R^2 - r^2} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (182)$$

Здесь нужно дать некоторое разъяснение в связи с использованием для силового расчета высоты h .

В соответствии с принципом верхней оценки можно предположить, что в рассматриваемый момент деформации зоны АВГ и БДЕ являются жесткими, а вся пластическая деформация происходит в области высотой h . Очевидно, что этот случай является кинематически возможным и, следовательно, дает верхнюю оценку силы рассматриваемого процесса выдавливания профилированного выступа. Строго говоря, при

таком подходе следовало бы использовать предельный коэффициент трения $\mu_1 = 0,5$, а на высоте ВГ — $\mu_2 = 0,5$, однако это бы сильно завысило расчетное значение силы (уже и так завышенное путем сведения высоты очага пластической деформации к минимальной) по сравнению с реальной силой. Поэтому для приближения верхней оценки к реальному значению силы выдавливания рекомендуется подставлять в расчетные формулы действительные значения коэффициентов μ_1 и μ_2 .

12. Вычисляется удельная деформирующая сила, знание которой необходимо для оценки прочности кольцевого пуансона и выбора материала для его изготовления:

$$q = \frac{P}{3,142(R^2 - r^2)}. \quad (183)$$

13. Вычисляется максимальное давление на стенку матрицы, знание которого необходимо для выбора материала матрицы, ее толщины, а также решения вопроса о необходимости бандажирования и выбора количества бандажей [10]:

$$p = 1,1\sigma_s \left\{ \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \times \left[\frac{h^2}{4} - \frac{R^2 - r^2}{2} + R^2 \ln \frac{R}{r} \right] + 0,275 \left[\left(\frac{R}{r} \right)^2 - 1 \right] + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} \right\}. \quad (184)$$

14. Вычисляется сила прижима, необходимая для удержания верхней оправки в заданном положении:

$$P_{\text{п}} = 3,456\sigma_s \left[0,5 \left(1 - \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) (r^2 - r_0^2) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) r^2 \ln \frac{r}{r_0} - 2 \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} r H \mu_2 \right]. \quad (185)$$

Продолжение исследования будет изложено в следующей статье.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Актуальность и постановка задачи. Ч. 1 // Технология металлов. 2024. № 7. С. 26—34.
2. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Определение кинематического и напряженного состояний. Ч. 2 // Технология металлов. 2024. № 8. С. 40—46.
3. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Определение деформированного состояния. Ч. 3 // Технология металлов. 2024. № 9. С. 20—24.
4. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Границы деформационных зон. Ч. 4 // Технология металлов. 2024. № 10. С. 19—24.
5. Воронцов А.Л. Методические указания по аппроксимации кривых упрочнения // Производство проката. 2001. № 3. С. 21—25.
6. Воронцов А.Л. Технологические задачи теории пластичности. Том 1. М.: Машиностроение, 2006. 474 с.
7. Воронцов А.Л. Технологические задачи теории пластичности. Том 2. М.: Машиностроение, 2006. 397 с.
8. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Том 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
9. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Том 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 441 с.
10. Белков Е.Г., Бнатын Г.В., Воронцов А.Л. и др. Ковка и штамповка. Справочник под ред. Е.И. Семенова. Том 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

Технологии и оборудование для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин дуговой и плазменно-порошковой наплавкой

Д.Б. СЛИНКО^{1, 2*}, канд. техн. наук, В.А. ДЕНИСОВ¹, д-р техн. наук,
А.В. ЧАВДАРОВ¹, канд. техн. наук

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, 109428,
Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
(МГТУ им. Баумана)», Москва, 105005, Российская Федерация

*E-mail: maks52@inbox.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-11-18-23

Статья поступила в редакцию 17.03.2025

Принята после доработки 21.04.2025

Принята к публикации 05.06.2025

Наиболее универсальной технологией для нанесения износостойких покрытий является дуговая наплавка твердыми сплавами, в связи с чем совершенствование оборудования и технологий для упрочнения рабочих органов дуговой наплавкой является весьма перспективным направлением для повышения их ресурса. Широко используемый метод наплавки плавящимся электродом повышает износостойкость рабочих органов. Альтернативным способом упрочнения является плазменная наплавка порошковыми материалами. Выполнены расчетные компьютерные исследования различных схем наплавки и определены оптимальные режимы для обеспечения наибольшей износостойкости почвообрабатывающих органов. Разработаны установки для упрочнения методом дуговой наплавки плавящимся электродом и плазменной наплавкой порошковыми материалами. На основании расчетных данных и натурных испытаний на износостойкость установлено, что наиболее перспективной является плазменно-порошковая наплавка двумя перекрывающимися валиками с внутренней стороны борона высотой 2 мм и шириной 6 мм. Разработанное оборудование позволяет выполнить упрочняющую наплавку в автоматическом режиме с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: рабочие органы, износостойкость, упрочнение, универсальная установка, дуговая наплавка, плазменно-порошковая наплавка.

Введение

Качество работ, выполняемых современной сельскохозяйственной техникой, зависит от состояния ее рабочих органов [1—3]. На сегодняшний день при изготовлении рабочих органов машин, эксплуатируемых в абразивной среде, существует два основных подхода.

Первый получил широкое распространение на российских заводах, осуществляющих выпуск запасных частей. При его использовании рабочие органы изготавливают в основном из легированных сталей 60, 65Г, 70Г с последующей закалкой и низким отпускком. Однако применение такой технологии и материалов не обеспечивает необходимого ресурса рабочих органов, так как в условиях прямого воздействия абразивных частиц они интенсивно изнашиваются.

Второй подход предусматривает использование высоколегированных сталей с последующим упрочнением режущей части твердыми сплавами. Упрочненные таким образом рабочие органы выпускают в основном специализированные зарубежные фирмы, например, *Molbro* (Дания), *MWS-Schneidwerkzeuge GmbH* (Германия), *La Pina* (Испания) и др. Однако они достаточно дороги, что неприемлемо для большинства фермерских хозяйств и малых сельскохозяйственных предприятий.

Таким образом, в условиях высокой стоимости импортных и недостаточного ресурса большинства изготавливаемых отечественных рабочих органов стоит задача увеличения ресурса их работы путем повышения износостойкости. Решение этой задачи возможно за счет упрочнения рабочих органов износостойкими материалами с применением средств автоматизации и современных технологий.

Наиболее универсальной технологией для нанесения износостойких покры-

тий является дуговая наплавка твердыми сплавами [4, 5], в связи с чем разработка и совершенствование оборудования и технологий, обеспечивающих высокую производительность и качество выполненных работ, а также снижение затрат при нанесении износостойких покрытий в процессе упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами, несомненно, является актуальной задачей.

Цель настоящих исследований состояла в определении расчетными и экспериментальными методами наиболее рациональной технологии нанесения износостойких покрытий на рабочие органы на примере дисков борон и в разработке оборудования для реализации выбранной технологии.

Методика

Моделирование рабочих условий проводилось для дисков борон с различными схемами наплавки (валиками по внутреннему и внешнему диаметру) для четырех вариантов формы валиков (рис. 1).

Выбор вариантов и схем наплавки основывался на литературных данных [6] и предварительно проведенных авторами наплавочных работ.

Оценку свойств наплавленных покрытий в рабочих условиях осуществляли *CFD*-методом, предназначенным для расчета характеристик потоковых процессов, в программе *Solid Works Flow Simulation* для дальнейшего компьютерного моделирования в модуле *Flowsimulation* [6, 7].

При исследовании абразивной износостойкости плазменных покрытий на натурных образцах дисков борон для наплавки валиков использовали порошки марок ПГС-27 и ПГ-10Н-01 [8]. Основные режимы наплавки: ток наплавки — 220 А; напряжение дуги — 22 В; общий расход смеси порошков — 60 г/мин.

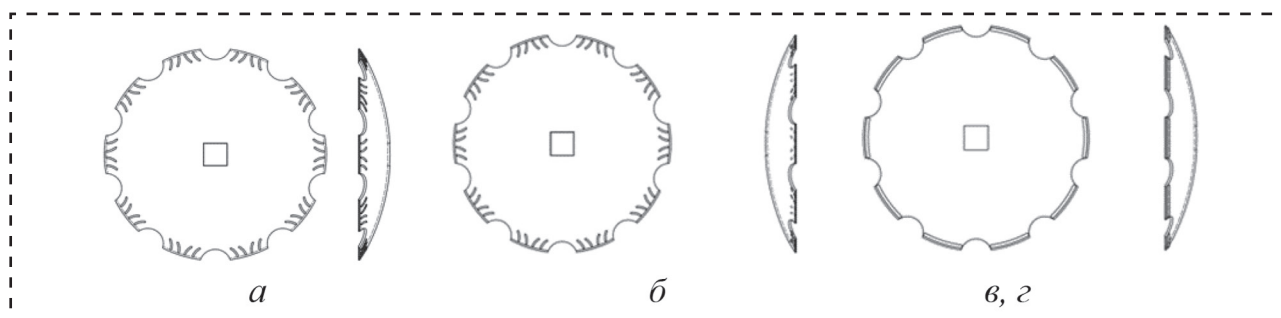


Рис. 1. Схемы наплавки дисков борон:

а — валиками с внешней стороны диска; *б* — валиками с внутренней стороны; *в, г* — сплошной наплавкой с внешней и внутренней сторон

Исследование абразивной износостойкости покрытий проводили на образцах, вырезанных из наплавленных дисков борон, по разработанной в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ методике сравнительной оценки износостойкости [9].

При создании универсальной установки для нанесения упрочняющих покрытий использовался блочно-модульный принцип.

Результаты и обсуждение

Были построены пять моделей дисков: модель диска бороны в заводском исполнении, с наплавкой валиков по дуге с внешней стороны, с наплавкой валиков по дуге с внутренней стороны и со сплошной наплавкой с внутренней и внешней сторон. При выборе геометрических параметров валиков для моделей дисков исходили из мировой практики использования механизированной наплавки полуавтоматической сваркой и плазменной наплавкой (табл. 1).

Результаты компьютерного моделирования показали, что наплавка по любой схеме приводит к снижению давления на зубья диска. Вне зависимости от угла

1. Геометрические размеры валиков

Вариант	Высота, мм	Ширина, мм
1	4	8
2	3	8
3	3	6
4	2	6

атаки и скорости обработки почвы давление снижается на 1400—2300 Па.

Ниже в табл. 2 и 3 представлены результаты, наиболее значимые для практического использования.

Наибольшее снижение давления почвы на диск бороны наблюдается при высоте наплавленного валика, приближающейся к 2 мм (см. табл. 2). При уменьшении или увеличении величины этого показателя происходит рост давления на 4000—7000 Па. Согласно результатам моделирования условий работы диска бороны с нанесенными валиками с постоянной высотой 2 мм и меняющейся шириной, минимальное давление почвы, равное 88397,7 Па, на поверхность диска бороны достигается при ширине валика 6 мм (см. табл. 3).

Способ дуговой наплавки плавящим электродом был опробован на различных

2. Давление частиц почвы на диски борон в зависимости от высоты валика при ширине 6 мм

Высота, мм	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Давление, Па	95245,646	92697,7	88672,23	92054,34	92379,32	93562,76

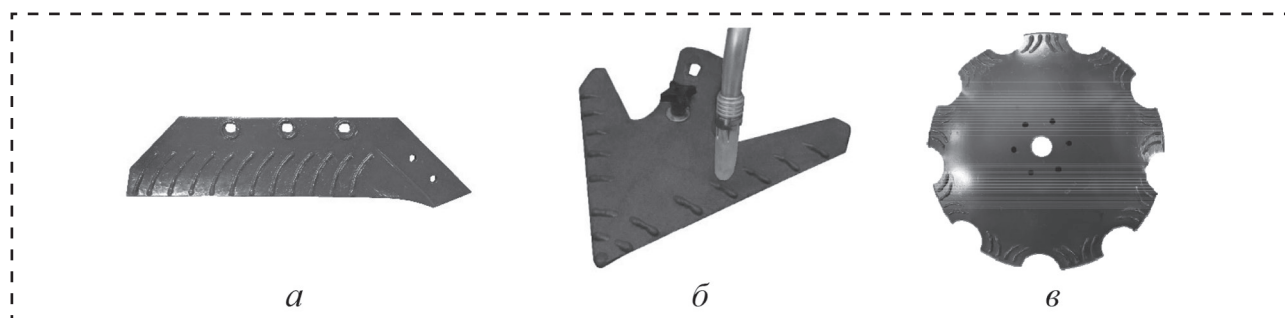


Рис. 2. Примеры рабочих органов, упрочненных дуговой наплавкой:

а — лемех; *б* — плуг; *в* — борона

3. Давление частиц почвы на диски борон в зависимости от ширины валиков при высоте 2 мм

Ширина, мм	4	6	8
Давление, Па	92645,6	88397,7	91272,2

рабочих органах почвообрабатывающих машин, в частности, при упрочнении лемехов, лап культиваторов и дисков борон (рис. 2).

При этом толщина покрытия всех рабочих органов, полученного дуговой наплавкой плавящимся электродом, значительно превышала 2 мм (в среднем составляла 5—7 мм), что в отдельных случаях негативно сказывалось на эксплуатационных свойствах упрочненных рабочих органов. Так, по результатам эксплуатационных испытаний лемехов фирмы *Lemken*, упрочненных дуговой наплавкой, тяговое усилие увеличивалось в среднем на 15%

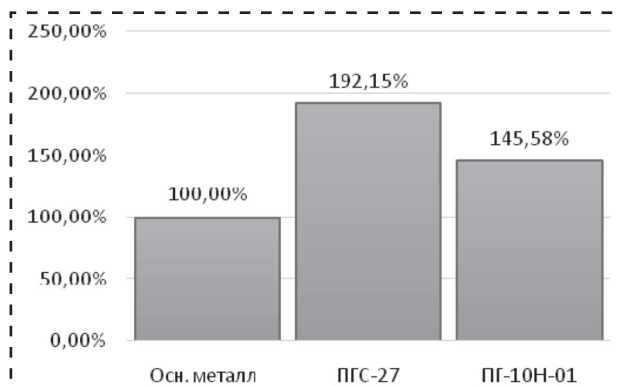


Рис. 3. Диаграмма относительной износостойкости образцов

по сравнению с ненаплавленными лемехами. Следует отметить, что получение валиков высотой менее 4 мм не представляется возможным методами электродуговой наплавки плавящимся электродом, в связи с чем для получения упрочняющих валиков необходимой геометрии был выбран метод плазменно-порошковой наплавки [10, 11].

Определяющим качественным показателем любого рабочего органа является его износостойкость, что практически означает длительную эксплуатацию без замены. На основе результатов компьютерного моделирования по наиболее оптимальной схеме, обеспечивающей наибольшее снижение давления на почву, были наплавлены образцы для оценки износостойкости.

Результаты испытаний показали повышение абразивной износостойкости натурных образцов дисковых борон с плазменно-порошковой наплавкой порошком марки ПГС-27 по сравнению с заводской технологией упрочнения в среднем в 2 раза (рис. 3).

Для реализации технологии, разработанной в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, создана универсальная автоматизированная установка портального типа (рис. 4) для упрочнения рабочих органов на основе трехкоординатного ЧПУ фрезерного станка.

При этом вместо шпинделя на станок монтируется или прямоточная водоох-

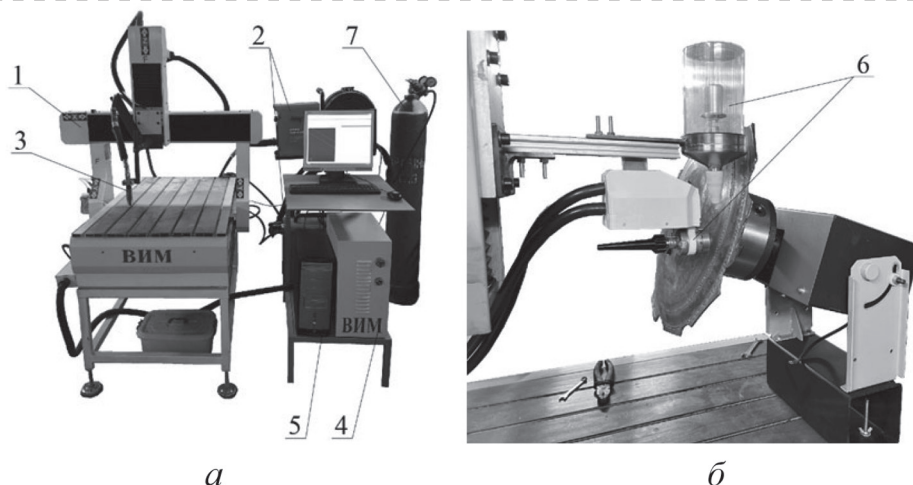


Рис. 4. Автоматизированная установка для упрочнения рабочих органов дуговой (а) и плазменной (б) наплавкой: 1 — установка портального типа; 2 — сварочный полуавтомат инверторного типа; 3 — прямоточная водоохлаждаемая горелка; 4 — блок управления; 5 — процессор; 6 — плазменная горелка с порошковым питателем; 7 — баллон со сварочной смесью или аргоном

лаждаемая горелка для дуговой наплавки, или плазмотрон с системой подачи порошка. Для наплавки различных рабочих органов в соответствии с выбранной технологией упрочнения написаны управляющие программы на G-кодах. Одним из преимуществ разработанной установки является модульность. Например, для реализации процесса упрочнения методом электродуговой наплавки порошковыми проволоками достаточно заменить модуль плазменно-порошковой наплавки на горелку для дуговой наплавки плавящимся электродом. Благодаря высокой степени автоматизации повышаются производительность процесса (на 70—90%) и качество наплавки.

Выводы

1. Компьютерное моделирование эксплуатации дисков борон при их упрочнении валиками в программном комплексе *Solid Works Flow Simulation* показало уменьшение поверхностного давления почвы на диск для всех вариантов наплавки на 1400—2300 Па и, как следствие, величины относительного износа.

2. В результате математического моделирования определены геометрические размеры наплавленных валиков (шириной 6 мм и высотой 2 мм), обеспечивающие наиболее существенное, в среднем до 5500 Па, снижение давление почвы на диск бороны.

3. В качестве базовой технологии упрочнения дисков борон рекомендуется использование технологии плазменно-порошковой наплавки нанесением износостойких валиков.

4. Сравнительные ускоренные испытания на абразивную износостойкость натурных образцов дисковых борон, упрочненных плазменно-порошковой наплавкой порошком марки ПГС-27, показали повышение абразивной износостойкости в среднем в 2 раза по сравнению с заводской технологией упрочнения дисковых борон.

5. Для промышленного использования рекомендуется автоматизированная установка, позволяющая повысить качество и производительность процесса наплавки на 70—90% и исключить влияние человеческого фактора.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. Михальченко А.М., Козарез И.В., Дьяченко А.В., Тюрева А.А. Изнашивание и ресурс восстановленных по различным технологиям отвалов сельскохозяйственного назначения // Технология металлов. 2021. № 1. С. 47—51. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-47-51. EDN QUJHRA.
2. Stawicki T., Kostencki P., Białobrzeska B. Roughness of ploughshare working surface and mechanisms of wear during operation in various soils // Metals. 2018. No 8 (12). P. 1042.
3. Галиновский А.Л., Кравченко И.Н., Величко С.А. и др. Повышение ресурса дисковых рабочих органов за счет использования новых материалов // Технология металлов. 2022. № 6. С. 43—48. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-6-43-48. EDN QSLZFO.
4. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 171 № 1. С. 41—50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
5. Слинко Д.Б., Денисов В.А., Добрин Д.А. и др. Повышение эффективности технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин электродуговой наплавкой износостойкими валиками // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 176—185. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-176-185. EDN PWNBSH.
6. Лысыч М.Н. Компьютерное моделирование процесса обработки почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12 № 3. С. 607—627. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-607-627.
7. Афанасьев А.В., Слинко Д.Б., Денисов В.А. Компьютерное моделирование условий работы дисков борон // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 2. С. 71—76. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-2-71-76. EDN EHYQOA.
8. Грядунов С.С., Сиваков В.В. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 4. С. 544—558. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202104.544-558.
9. Рожков Ю.Н., Аулов В.Ф. Методика испытаний на относительную износостойкость на основе мобильного устройства ВИМ ЛТДП // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 12. С. 75—79. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-12-75-79.
10. Ожегов Н.М., Слинко Д.Б. Повышение качества формирования покрытий плазменно-порошковой наплавкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 3. С. 34—38. EDN YGAGSF.
11. Сом А.И. Влияние схемы ввода порошка в дугу на его потери и эффективность процесса плазменно-порошковой наплавки // Автоматическая сварка. 2015. № 5, 6 (742). С. 26—29.

Уважаемые авторы!

Со второго полугодия 2018 г. (с № 7/2018) статьям, опубликованным в научных журналах ООО «Наука и технологии», на основании договора с фирмой Crossref/NEICON присваивается индекс DOI.

Загрузку метаданных статьи в базу Crossref осуществляет сам автор по инструкции, приведенной на сайте <http://elpub.ru>. Необходимые для загрузки дополнительные данные и инструкции редакция передает автору по e-mail после выпуска очередного номера журнала.

Загруженный в Crossref индекс DOI следует указывать при цитировании статьи в списках литературы.

Определение параметров деформирующего инструмента для строчного поверхностного пластического деформирования

С.А. ЗАЙДЕС¹, д-р техн. наук, проф., Т.Т. ЛЕ^{2*}, аспирант

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, 664074, Российская Федерация

*E-mail: lechung275@gmail.com

DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-11-24-36

Статья поступила в редакцию 10.04.2025

Принята после доработки 19.05.2025

Принята к публикации 06.08.2025

На основе конечно-элементного моделирования определены основные геометрические параметры деформирующего инструмента, обеспечивающие интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях при строчном поверхностном пластическом деформировании (ППД). Установлено рациональное расстояние между вершинами профилей и угол между осями вращения роликов. Представлена оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении одним и двумя роликами при разном расположении осей их вращения.

Ключевые слова: строчное ППД, остаточные напряжения, ANSYS, тороидальный ролик, моделирование, упрочнение, геометрия инструмента.

Введение

Эксплуатационная надежность изделий машиностроения во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей и элементов конструкций. Качество деталей, в свою очередь, зависит от состояния поверхностного слоя, который в первую очередь оказывает действие на его износостойкость, воспринимает силовые и температурные воздействия, влияющие на зарождение микродефектов

и микротрещин. Для повышения качества поверхностного слоя после механической обработки резанием на практике достаточно широко применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющую не только сгладить микронеровности поверхности и упрочнить поверхностный слой, но и сформировать в нем сжимающие остаточные напряжения [1—4]. Благодаря отделочно-упроч-

няющей обработке ППД повышается износостойкость деталей, усталостная прочность, контактная жесткость, прочность прессовых соединений и целый ряд других эксплуатационных свойств деталей машин [5, 6].

В машиностроительных конструкциях широко используют детали цилиндрической формы, такие как валы, оси, штанги, штоки. Традиционная кинематика упрочнения таких деталей основана на вращении заготовки (главное движение) и перемещении рабочего инструмента вдоль оси заготовки (движение подачи) [7, 8]. Пластический след при такой кинематике процесса представляет собой винтовую поверхность с весьма малым шагом. Можно считать, что упрочненные волокна располагаются практически перпендикулярно оси детали. Такие же по направлению следы возникают и при традиционном точении цилиндрических заготовок [9].

Если оценивать микрорельеф поверхностного слоя после ППД с указанной кинематикой процесса, то с точки зрения прочности материала он является малоэффективным, так как представляет собой поверхность с множеством микроконцентраторов напряжений. Особенно ярко это видно после обработки режущим инструментом, но и при воздействии деформирующего инструмента на поверхности деталей формируются микрообласти с большей и меньшей прочностью материала. Такой вид концентрации напряжений отрицательно сказывается на сопротивлении деталей растяжению, сжатию и изгибу. Поперечные следы от механической обработки оказывают существенное влияние и на прочность прессовых соединений [10].

Альтернативой указанному выше направлению пластических следов могут служить следы, расположенные вдоль образующей цилиндра или под небольшим углом

к оси детали. Такие следы формируются в ряде технологических процессов, например, при правке цилиндрических деталей тороидальным роликом [11, 12]; продольная текстура формируется при дорновании отверстий и при охватывающем упрочнении деталей типа валов [13, 14].

Однако при использовании одного ролика эффективность упрочнения с точки зрения формирования интенсивного напряженного состояния невысока. Так, в работах [15, 16] установлено, что упрочнение сдвоенным тороидальным инструментом дает возможность увеличения напряженного состояния в зоне деформации по сравнению с одним роликом. Это достигается за счет наложения упругопластических полей в зоне деформации от каждого ролика. Аналогичный эффект был получен и при использовании для упрочнения мультитрадиусного ролика, имеющего несколько профильных радиусов [17].

Вопрос интенсификации напряженного состояния в очаге деформации имеет важное значение не только для формирования повышенных механических характеристик поверхностного слоя, но и для упрочнения нежестких деталей, так как позволяет получить необходимые характеристики упрочненного материала без увеличения радиального натяга.

Цель данной работы — на основе конечно-элементного моделирования обосновать конструкцию деформирующего инструмента и определить размеры его параметров, обеспечивающие интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации и формирование максимальных сжимающих остаточных напряжений при строчном поверхностном пластическом деформировании.

Схема технологического процесса

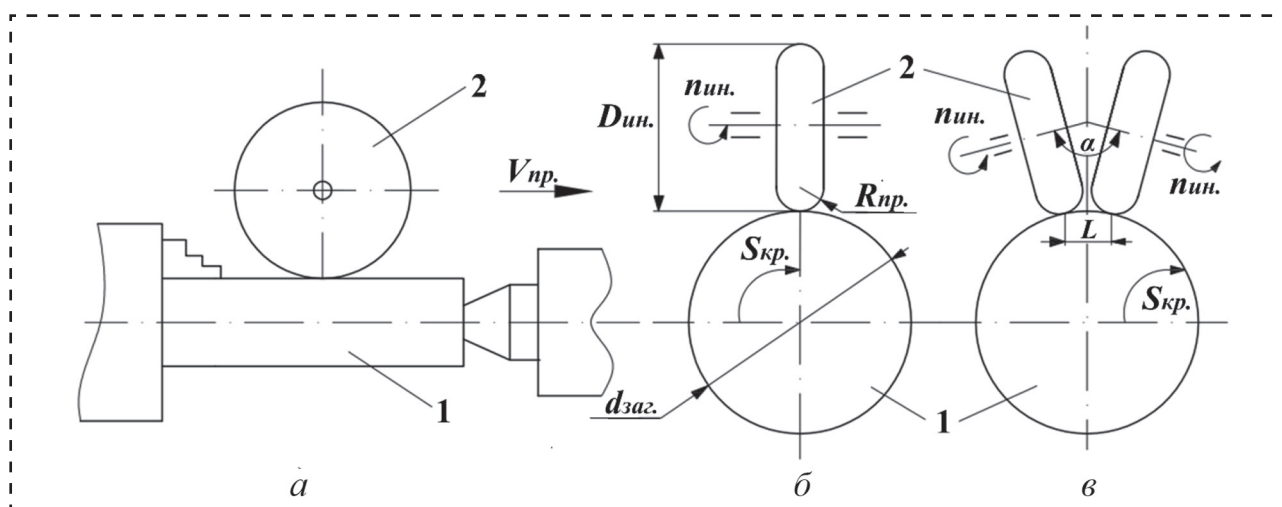
Наиболее результативное деформационное упрочнение металлов достигается

за счет направленного технологического воздействия на их структуру, способствующего увеличению плотности дислокаций и формированию дислокационной субструктуры, повышающей сопротивляемость сдвигу. Таким образом, повышение прочностных характеристик металлов связано с разработкой технологий упрочнения, позволяющих создать такое структурное состояние материала, при котором принципы дислокационной теории упрочнения реализуются максимально эффективно [18].

Способ строчного ППД предназначен для интенсификации напряженного состояния рабочей поверхности деталей и расширения технологических возможностей при локальном поверхностном пластическом деформировании за счет формирования продольных и винтовых следов, влияющих на сопротивление материала внешним воздействием. В данном способе главное движение — скорость перемещения рабочего инструмента, а круговая подача обеспечивается циклическим поворотом заготовки (рис. 1). Такая кинематика процесса создает пластическое де-

формирование всей цилиндрической поверхности заготовки.

В ранее опубликованных работах [19, 20] было установлено, что использование двухпрофильного ролика или двойных роликов, воздействующих на очаг упругопластической деформации, формирует напряженное состояние большей интенсивности, а также остаточные сжимающие напряжения большей величины по сравнению с упрочнением одним однопрофильным роликом. Однако сдвоенные ролики рассматривались при традиционных процессах упрочнения, когда оси вращения заготовки и инструмента параллельны между собой. При строчном ППД ось вращения ролика расположена перпендикулярно оси вращения заготовки, поэтому в данной работе определяется напряженное состояние как при упрочнении одним тороидальным роликом, так и двумя роликами (см. рис. 1). Так как ролики перемещаются по образующей поверхности цилиндра, то их целесообразно расположить под некоторым углом α , который обеспечит интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации.



Данные для конечно-элементного моделирования

Для исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей при упрочнении методами пластической деформации целесообразно использовать численное моделирование, основанное на методе конечных элементов. Такой подход позволяет учесть сложные процессы, происходящие в материале при воздействии упрочняющего инструмента, а также получить более точные данные о распределении напряжений и деформаций. В настоящей работе для моделирования технологического процесса применена программа *ANSYS*, которая эффективно реализует метод конечных элементов и широко используется в инженерной практике [21, 22]. Преимуществом данного подхода является возможность учитывать не только геометрию инструмента, детали, свойства материала, но и параметры самого процесса упрочнения, включая скорость обработки и силу деформирующего воздействия.

Динамическое моделирование в отличие от статического позволяет воспроизводить реальное взаимодействие инстру-

мента с поверхностным слоем детали, что особенно важно для корректного определения временных и остаточных напряжений. Кроме того, оно дает возможность проанализировать формирование остаточных деформаций, а также выявить потенциальные зоны концентрации напряжений. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации технологических параметров упрочнения с целью повышения ресурса и надежности деталей машин. Таким образом, численное моделирование с применением *ANSYS* представляет собой эффективный инструмент для комплексного анализа процессов поверхностного упрочнения деталей машин (рис. 2).

Для построения конечно-элементной модели использована заготовка в виде цилиндра диаметром $d_{\text{зар}} = 30$ мм, материал — сталь 45, обладающая упругопластическими свойствами с упрочнением. Основные характеристики материала: модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, диаграмма деформирования билинейная с пределом текучести $\sigma_T = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

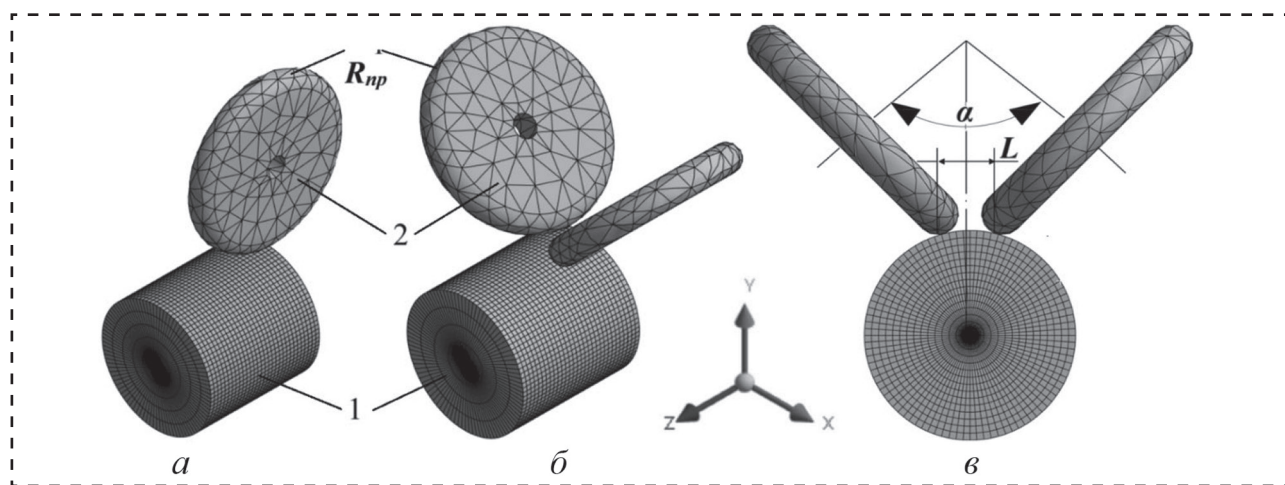


Рис. 2. Конечно-элементные модели при строчном упрочнении цилиндрических образцов поверхностным пластическим деформированием при воздействии одного (а) и двух роликов (б, в):

1 — заготовка; 2 — рабочий инструмент

В качестве материала инструмента выбрана сталь SKD11, обладающая высокой твердостью и износостойкостью. Данная марка относится к холодноработающим инструментальным сталям и производится в соответствии с японским промышленным стандартом JIS (*Japanese Industrial Standards*). Ее характеристики: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. В зоне контакта между инструментом и образцом задан коэффициент трения $f = 0,1$.

При помощи CAD/CAE системы ANSYS 23.2 конечно-элементная форма цилиндрического образца создана со следующими параметрами: сетка квадратной формы размером 1 мм, содержит 13 000 конечных элементов и 58 948 узлов.

Для оценки обобщенного напряженного состояния в разных точках цилиндрического образца определена интенсивность временных и остаточных напряжений (*Von Mises*) по осям O_z (осевые σ_z^{BP} , σ_z^{OCT}), O_y (радиальные σ_r^{BP} , σ_r^{OCT}), O_x (тангенциальные σ_ϕ^{BP} , σ_ϕ^{OCT}) [23]. При этом напряженное состояние цилиндра по Мизесу при использовании главных напряжений определяется по интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных напряжений σ_i^{OCT} :

$$\sigma_i^{BP} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{BP} - \sigma_\phi^{BP})^2 + (\sigma_\phi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2]}. \quad (1)$$

По аналогичной формуле определяется интенсивность остаточных напряжений (σ_i^{OCT}). Интенсивность относительной деформации рассчитывается с учетом трех компонент, соответствующих главным направлениям цилиндрической системы координат: осевой ϵ_z (по оси O_z), радиальной ϵ_r (по оси O_y), тангенциальной ϵ_ϕ (по оси O_x). Величина определяется по следующей формуле [24]:

1. Базовые режимы и параметры при моделировании строчного поверхностного пластического деформирования

Циклическая круговая подача заготовки $S_{кр}$, град./ход	6°
Диаметр заготовки $d_{заг}$, мм	30
Диаметр инструмента $D_{ин}$, мм	40
Профильный радиус $R_{пр}$, мм	3
Продольная скорость рабочего инструмента $V_{пр}$, мм/с	30
Натяг t , мм	0,1
Угол между осью вращения роликов α , град.	90
Расстояние между вершинами роликов L , мм	5

$$\epsilon_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\epsilon_z - \epsilon_\phi)^2 + (\epsilon_\phi - \sigma_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2]}. \quad (2)$$

Для определения рациональных значений геометрических параметров рабочего инструмента использованы базовые режимы строчного упрочнения (табл. 1).

Результаты моделирования

В процессе пластической деформации формируются как временные, так и остаточные напряжения, оказывающие значительное влияние на механические характеристики детали. Временные напряжения возникают в момент непосредственного контакта инструмента с заготовкой и характеризуются высокой неравномерностью. После снятия нагрузки в материале формируются остаточные напряжения, величина и характер распределения которых зависят от геометрии инструмента, параметров упрочнения и свойств материала. Анализ полученных результатов показывает, что остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое способствуют повышению усталостной прочности и ресурса детали [25]. Выбор и обоснование конструкции деформирующего инструмента были разделены на два этапа. Первый этап

заклучался в определении геометрии одного тороидального ролика, а второй этап был посвящен определению геометрического расположения одного ролика относительно другого (см. рис. 1, в). Геометрия тороидального ролика оценивается двумя основными параметрами, влияющими на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей: диаметр $D_{ин}$ и профильный радиус $R_{пр}$.

На рис. 3 представлена зависимость максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от диаметра деформирующего инструмента. Анализ результатов показывает, что с увеличением диаметра инструмента наблюдается снижение как временных, так и остаточных напряжений. Наибольшие значения напряжений зафиксированы при диаметре $D_{ин} = 20$ мм: $\sigma_{max}^{вр.} = 590$ МПа, $\sigma_{max}^{ост.} = 410$ МПа. Пунктирной линией обозначена (здесь и далее) интенсивность остаточных напряжений, которые превышают предел текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа). Такие напряжения возникают при диаметре тороидального ролика менее 32 мм, поэтому для дальнейших расчетов принят диаметр ролика $D_{ин} = 35$ мм.

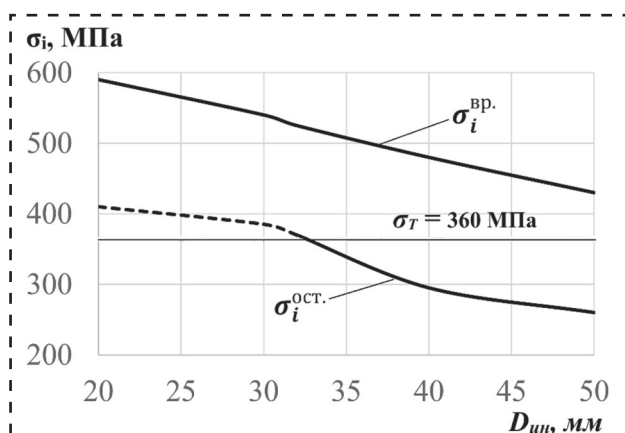


Рис. 3. Влияние диаметра тороидального ролика ($D_{ин}$) на интенсивность максимальных временных остаточных напряжений (профильный радиус $R_{пр} = 3$ мм)

Для оценки влияния радиуса профиля деформирующего ролика на максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений на рис. 4 приведены результаты численного моделирования при фиксированном диаметре ролика $D_{ин} = 35$ мм и изменении радиуса профиля в диапазоне от 1 до 5 мм. Увеличение радиуса профиля ролика приводит к снижению как временных, так и остаточных напряжений в поверхностном слое (см. рис. 4). Максимальные значения напряжений отмечены при $R_{пр} = 1$ мм: $\sigma_{max}^{вр.} = 620$ МПа, $\sigma_{max}^{ост.} = 420$ МПа; минимальные — при $R_{пр} = 5$ мм: $\sigma_{max}^{вр.} = 410$ МПа, $\sigma_{max}^{ост.} = 247$ МПа. При профильном радиусе ролика $R_{пр} < 2,3$ мм интенсивность максимальных остаточных напряжений превышает предел текучести материала, что приводит к их практическому устранению, поэтому профильный радиус принят размером 2,5 мм.

Зоны пластической деформации, образующиеся в результате контактного взаимодействия рабочего инструмента с поверхностью материала, играют ключевую роль в формировании эксплуатационных характеристик упрочненного слоя.

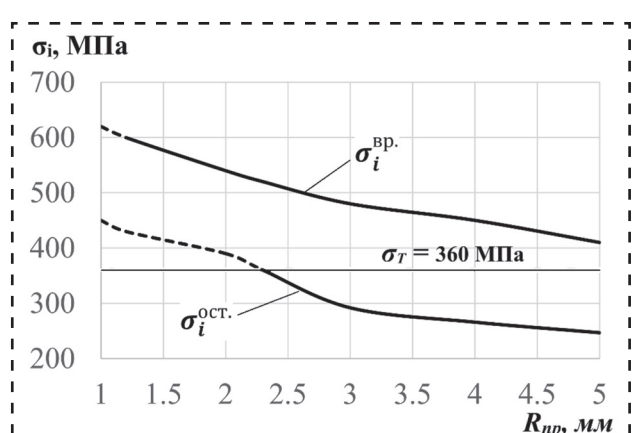


Рис. 4. Влияние величины профильного радиуса ($R_{пр}$) на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений (диаметр ролика $D_{ин} = 35$ мм)

Конфигурация и размеры этих зон зависят от параметров нагружения и геометрии инструмента, отражая специфическое поведение материала в условиях локального напряженного состояния. Глубина проникновения пластической деформации служит важным критерием для оценки прочностных и усталостных свойств деталей, подвергающихся обработке ППД. На рис. 5 показана глубина области пластической деформации h , полученная в ходе численного моделирования при базовых режимах обработки, а в табл. 2 представлены ее значения и величина радиальных напряжений в зависимости от диаметра и радиуса профиля инструмента.

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что при уменьшении диаметра деформирующего инструмента и радиуса его профиля наблюдается увеличение глубины слоя пластической деформации. Основным фактором, определяющим протяженность пластической зоны в глубину, является величина временного радиального напряжения в области контакта между инструментом и заготовкой.

Данный вывод полностью подтверждается зависимостями, представленными на рис. 3 и 4, иллюстрирующими влияние геометрических параметров инструмента. Наименьшая глубина зоны деформации зафиксирована при максимальных значе-

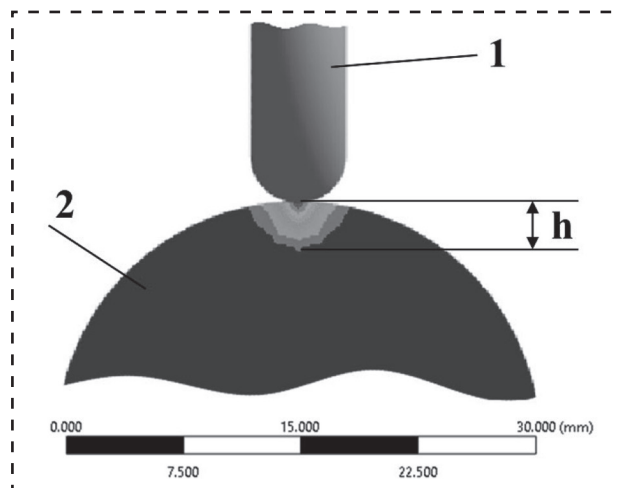


Рис. 5. Поля распределения пластической деформации в поперечном сечении образца при строчном упрочнении деталей:

1 — рабочий инструмент; 2 — заготовка

ниях диаметра инструмента $D_{ин} = 50$ мм и радиуса профиля $R_{пр} = 5$ мм. Для принятых размеров $D_{ин} = 35$ мм и радиуса профиля $R_{пр} = 2,5$ мм глубина пластической зоны составляет 3,28 мм.

Во второй части исследования было определено напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей при использовании двух тороидальных роликов, расположение которых оценивается расстоянием между вершинами профиля L и углом наклона осей вращения роликов α (см. рис. 1).

В целях интенсификации напряженного состояния обрабатываемой поверхности и расширения технологических воз-

2. Влияние диаметра и профильного радиуса рабочего инструмента на глубину пластической зоны и величину радиального напряжения в зоне деформации

При $R_{пр} = 3$ мм			При $D_{ин} = 35$ мм		
$D_{ин}$, мм	h , мм	σ_r^{bp} , МПа	$R_{пр}$, мм	h , мм	σ_r^{bp} , МПа
20	4,35	–1084,31	1	4,52	–1051,86
30	3,75	–1031,42	2	3,69	–918,82
35	3,2	–857,64	2,5	3,28	–887,53
40	2,88	–828,56	3	2,88	–828,56
50	2,42	–756,21	4	2,47	–761,46
			5	2,15	–535,67

можностей локального поверхностного пластического деформирования может быть применена конструктивная схема деформирующего инструмента, представленная на рис. 1, б. В данной конфигурации упрочнение осуществляется одновременно двумя деформирующими роликами, расположенными симметрично относительно образующей цилиндра. Оси вращения роликов пересекаются под углом $60^\circ < \alpha < 150^\circ$, направленным в сторону зоны деформации, что способствует формированию продольных и спиральных следов на обрабатываемой поверхности цилиндрической детали.

Одним из ключевых параметров, определяющих механизм деформации и процесс структурообразования, является расстояние между вершинами деформирующих роликов. Его оптимизация необходима для обеспечения интенсивной пластической деформации. При определенных значениях расстояния между вершинами профиля роликов происходит наложение и взаимодействие двух очагов деформации, что приводит к их слиянию в единую зону сложного напряженно-деформированного состояния. На рис. 6 представлены результаты моделирования, иллюстрирующие зависимость максимальной интенсивно-

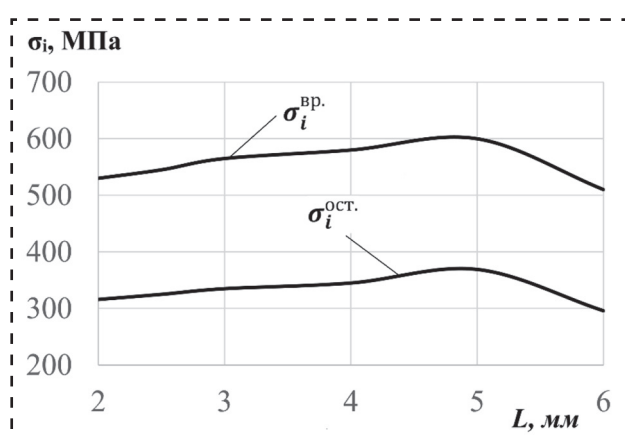


Рис. 6. Влияние расстояния L между вершинами роликов на максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений

сти остаточных и временных напряжений от расстояния между вершинами роликов L (при $D_{ин} = 35$ мм, $R_{пр} = 2,5$ мм, $\alpha = 90^\circ$). Установлено, что существует оптимальный интервал расстояний $L = 4—5$ мм, при котором достигаются наибольшие значения напряжений в области деформации. При дальнейшем увеличении расстояния ($L > 6$ мм) зоны пластической деформации становятся изолированными, и деформирующий эффект соответствует работе обычного одноролькового инструмента.

На рис. 7 представлена зависимость максимальных значений временных и остаточных напряжений от угла между осями вращения деформирующих роликов α при фиксированном расстоянии между их вершинами $L = 5$ мм.

Максимальные значения интенсивности напряжений зафиксированы при угле $\alpha = 90^\circ$ и составляют: $\sigma_{max}^{вр.} = 600$ МПа, $\sigma_{max}^{ост.} = 369$ МПа, что свидетельствует о наиболее интенсивном воздействии на упрочняемый материал.

На рис. 8 представлена глубина зоны пластической деформации h , определенная по результатам численного моделирования при базовых условиях нагружения, а в табл. 3 приведены численные значения

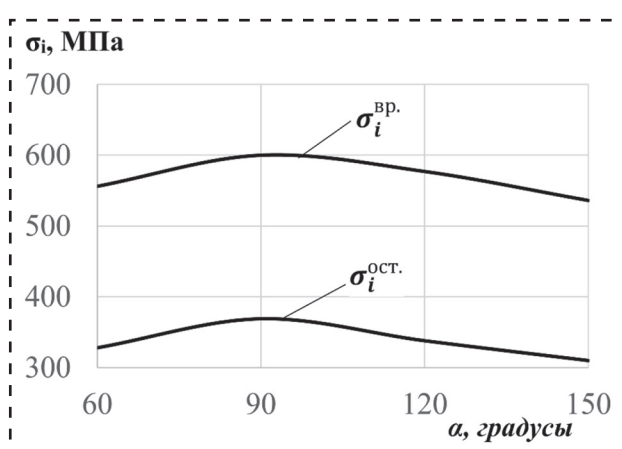


Рис. 7. Влияние угла α между осью вращения роликов на максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений

3. Влияние расстояния между вершинами роликов (L) и угла между осями вращения роликов (α) на глубину пластической зоны (h) и величину радиального напряжения (σ_r^{bp}) в зоне деформации

При $\alpha = 90^\circ$			При $L = 5$ мм		
L , мм	h , мм	σ_r^{bp} , МПа	α , град.	h , мм	σ_r^{bp} , МПа
2	3,15	–595,16	60	3,24	–593,82
3	3,31	–644,93	90	3,75	–676,38
4	3,44	–665,19	120	3,51	–628,56
5	3,75	–676,38	150	3,46	–603,81
6	2,92	–611,55			

глубины пластической деформации и соответствующие величины радиального напряжения в зависимости от расстояния между вершинами роликов и угла между осями вращения роликов.

Изменение расстояния L между вершинами роликов, а также угла α между их осями вращения оказывает влияние не только на ширину зоны деформации, но и на ее глубину. Максимальная глубина пластической зоны была зафиксирована при $L = 5$ мм и $\alpha = 90^\circ$ и составила $h = 3,75$ мм. Одновременно наблюдается изменение радиального напряжения. Сравнительный анализ с данными табл. 2 показывает, что применение двухроликовой схемы деформирования способствует увеличению глубины зоны пластической деформации, при этом сопровождаясь снижением уровня радиальных напряжений.

Рассмотрим влияние профильных радиусов на совместное действие двух тороидальных роликов. Ранее было установлено [26], что сдвоенный тороидальный ролик с разными радиусами расширяет технологические возможности процесса ППД. Меньший радиус профиля позволяет усилить напряженное состояние упрочненного слоя, а больший радиус профиля оказывает положительное влияние на снижение микронеровности поверхности. Рассмотрим, каким образом изменяется напряженное состояние при действии двух роликов с разными профильными радиусами.

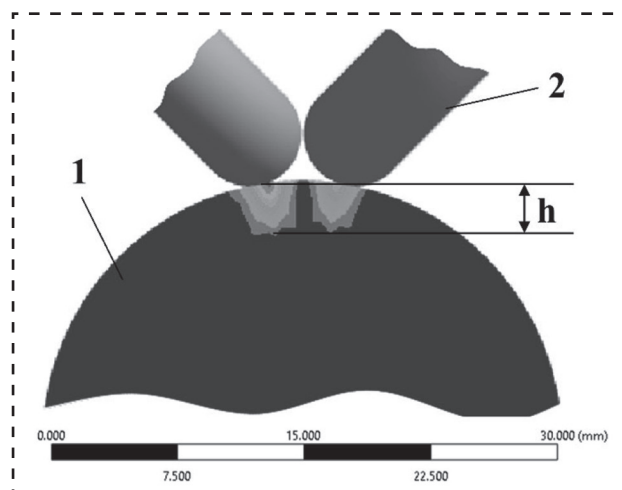


Рис. 8. Поля распределения пластической деформации в поперечном сечении образца при строчном упрочнении деталей двумя роликами:

1 — рабочий инструмент; 2 — заготовка

На рис. 9 представлены значения максимальных интенсивностей временных и остаточных напряжений при двух вариантах: при использовании двух роликов с одинаковым радиусом профиля $R_{пр} = 3$ мм (см. рис. 9, а) и при применении комбинированной схемы с разными радиусами — $R_1 = 3$ мм, $R_2 = 4$ мм. Результаты численного моделирования показывают, что в первом случае достигаются более высокие значения $\sigma_{max}^{bp} = 600$ МПа, $\sigma_{max}^{ост} = 369$ МПа по сравнению со вторым случаем (531,47 МПа и 356,07 МПа соответственно). Снижение напряженного состояния при использовании двух роликов с разными профильными радиусами по сравнению с результатами, полученными

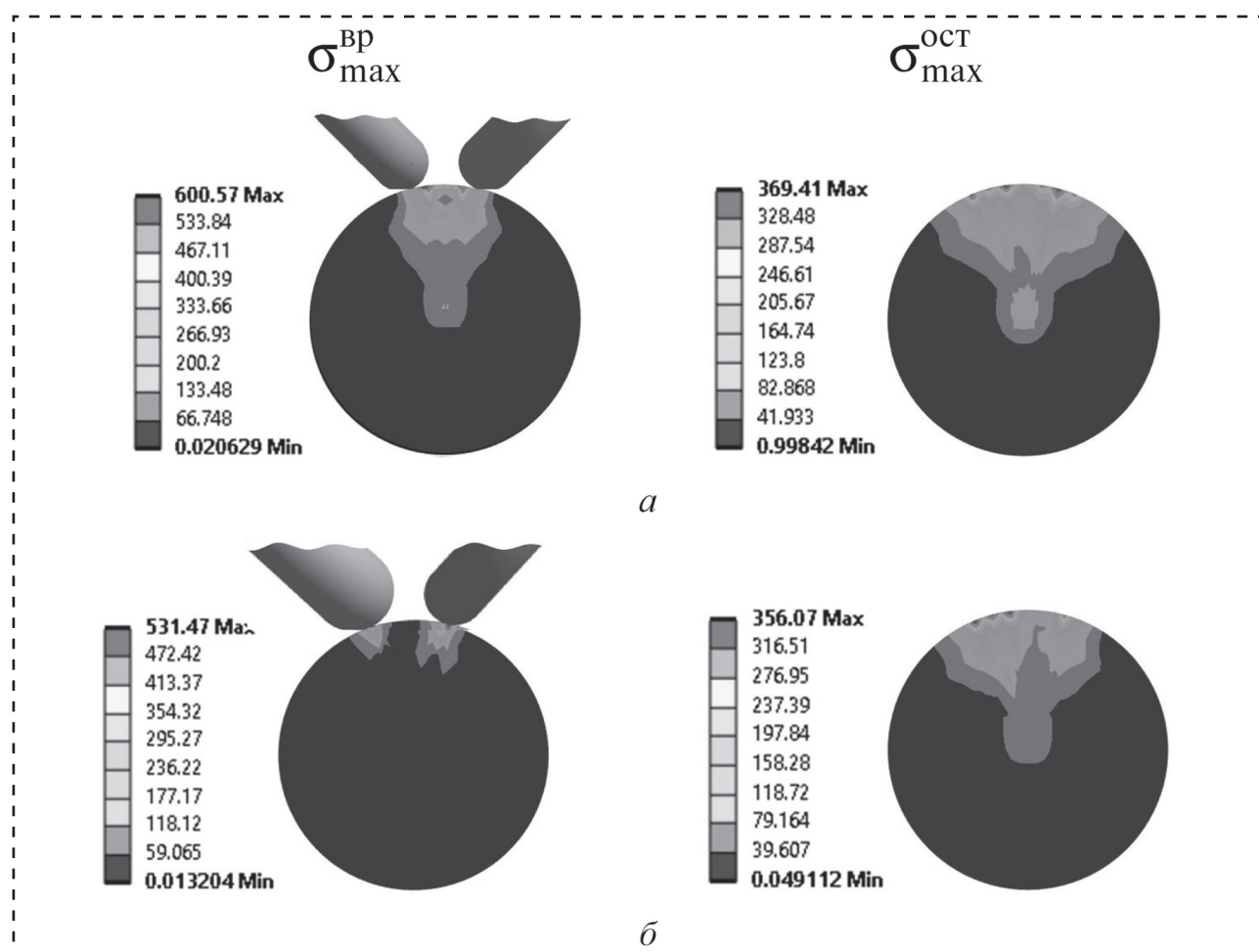


Рис. 9. Влияние профильных радиусов ($R_{пр}$) на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений:

a — 2-роликовый инструмент с одинаковым радиусом профиля ($R_1 = R_2 = 3$ мм); $б$ — 2-роликовый инструмент с разным радиусом профиля ($R_1 = 3$ мм, $R_2 = 4$ мм)

ми при роликах с одинаковыми профильными радиусами, объясняется только тем, что во втором случае был использован ролик с большим радиусом ($R_{пр} = 4$ мм), при котором напряженное состояние ниже, чем при $R_{пр} = 3$ мм.

Для выявления резервов по усилению напряженного состояния упрочненного слоя полезно рассмотреть и расположение двух роликов при строчном деформировании цилиндрических деталей (рис. 10).

В частности, рассмотрены следующие конфигурации: рис. 10, a — однорадиусный ролик; рис. 10, $б$ — два ролика, распо-

ложенные перпендикулярно поверхности заготовки; рис. 10, $в$ — два ролика, оси вращения которых образуют между собой угол 90° . Согласно полученным данным, наибольшие значения временных и остаточных напряжений наблюдаются при использовании схемы с двумя роликами, расположенными под углом 90° ($\sigma_{\max}^{вр} = 600$ МПа, $\sigma_{\max}^{ост} = 369$ МПа). Минимальные значения отмечаются при применении однорадиусного ролика: $\sigma_{\max}^{вр} = 477,55$ МПа, $\sigma_{\max}^{ост} = 292,11$ МПа.

Традиционный однопрофильный тороидальный ролик обладает более простой

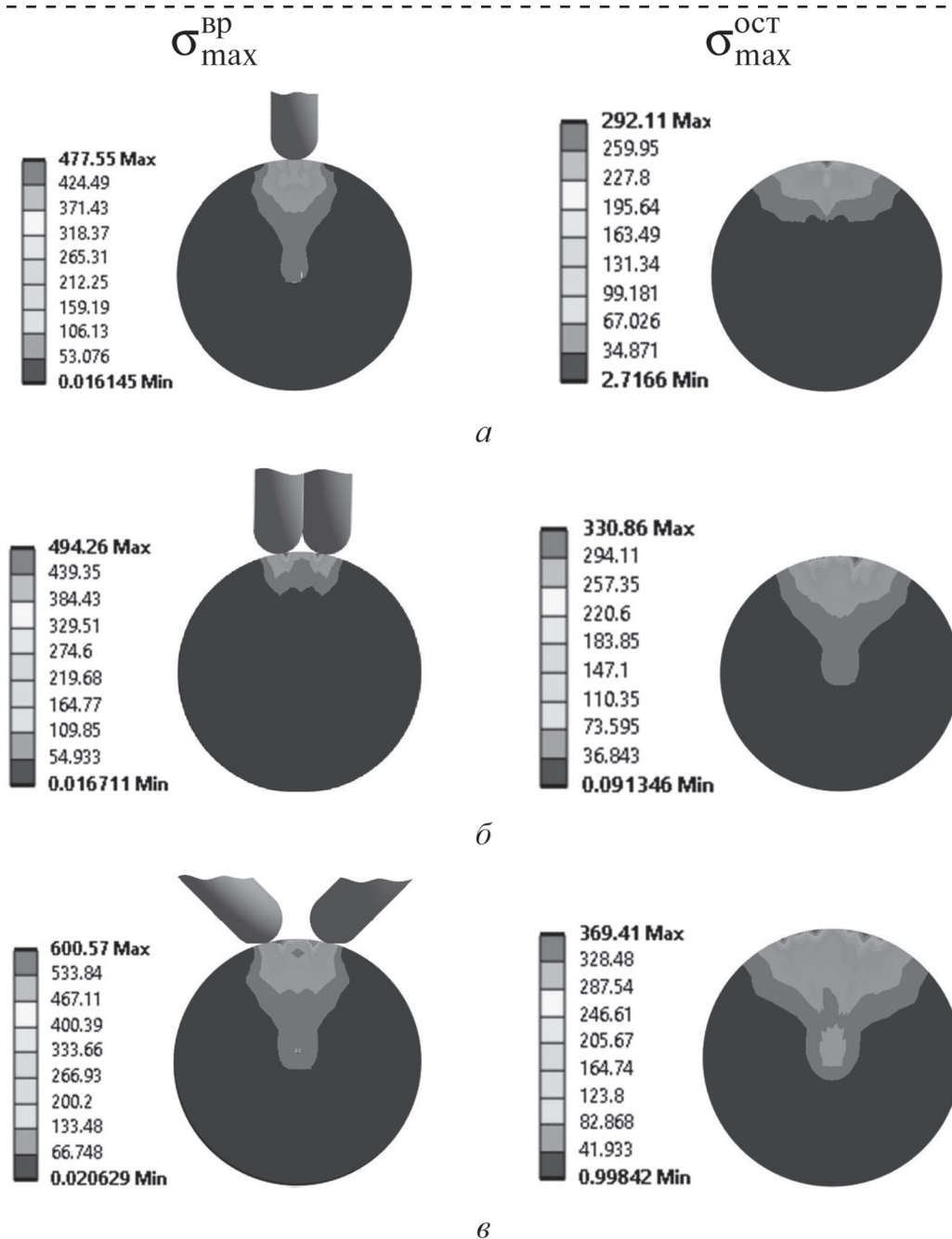


Рис. 10. Влияние тороидальных роликов на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений

конструкционной схемой, но, как показывают результаты моделирования и расчетов, он имеет низкие технологические возможности, так как может обеспечить либо упрочняющий эффект (при малом профильном радиусе), либо сглаживающий (при большом профильном радиусе).

Наиболее эффективной с точки зрения увеличения интенсивности временных и остаточных напряжений оказалась схема с двумя роликами, оси которых расположены под углом 90° друг к другу (см. рис. 10, б). Данная конфигурация способствует формированию более глубокой

и широкой зоны пластической деформации за счет взаимного наложения напряжений от каждого ролика, что особенно важно для строчного ППД. Таким образом, угловая двухроликовая схема может быть рекомендована для процессов строчного поверхностного упрочнения деталей, эксплуатируемых в условиях переменных нагрузок и требующих повышенной усталостной прочности.

Выводы

В результате проведенного численного моделирования установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое цилиндрических заготовок при строчном поверхностном пластическом деформировании. Показано, что геометрические параметры деформирующего инструмента — диаметр ролика, профильный радиус, угол между осями вращения и расстояние между вершинами роликов — оказывают существенное влияние на величину временных и остаточных напряжений, а также на глубину зоны пластической деформации.

Наибольшие значения остаточных и временных напряжений достигаются при использовании двухроликовой схемы с углом между осями вращения 90° и одинаковыми радиусами профиля. Установлены оптимальные параметры инструмента ($D = 35$ мм; $R_{\text{пр}} = 2,5$ мм; $L = 5$ мм; $\alpha = 90^\circ$), обеспечивающие формирование более интенсивного напряженно-деформированного состояния и значительных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

Полученные результаты могут быть использованы для конструирования и оптимизации деформирующих инструментов, а также для повышения эффективности

технологических процессов на основе строчного ППД деталей машин.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. **Sasahara H.** Influence of cutting conditions on residual stress and surface hardness in hard turning of steel and their effect on fatigue life // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. No 45 (2). P. 131—136.
2. **Li Y., Wang P., Wang F., Zhu L., Qiu J.** Surface Severe Plastic Deformation Treatments for Fatigue Enhancement of 304 Stainless Steel // Metal. 2020. No 10 (9). P. 1—16.
3. **Марченко А.В., Лисовский Д.А., Яценко А.А.** Повышение качества поверхностного слоя и трибологических характеристик деталей из стали методами поверхностного пластического деформирования // Проблемы трибологии. 2020. № 2 (96). С. 33—42.
4. **Никитин К.В., Альтенбергер И.** Повышение усталостной прочности стали 304 методом лазерного упрочнения и глубокой прокатки при повышенных температурах // Физика и механика материалов. 2007. № 6. С. 65—72.
5. **Королев С.А., Тарасенко С.В.** Повышение эксплуатационных характеристик деталей машиностроения методом поверхностного пластического деформирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 5. С. 79—85.
6. **Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M.** Surface treatments for enhancing the fatigue performance of metals: A review // Procedia Engineering. 2013. No 66. P. 545—554.
7. **Бочкарев А.Н., Бочкарев В.В.** Повышение усталостной прочности валов методом поверхностного пластического деформирования // Вестник машиностроения. 2015. № 10. С. 45—48.
8. **Иванов И.И., Петров П.П.** Влияние поверхностного пластического деформирования на износостойкость цилиндрических деталей // Технология машиностроения. 2018. № 7. С. 30—35.
9. **Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Бардинова С.Н.** Расчетное определение параметров упрочнения материала поверхностного слоя деталей при механической обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 8. С. 353—360.

10. Ковалев А.В. Влияние шероховатости поверхностей на прочность прессовых соединений // Технология машиностроения. 2015. № 12. С. 45—48.
11. Патент RU № 2146598 C1, СПК B21D 1/02. Машина для правки и упрочнения цилиндрических изделий / Тютрин Н.О., Зайдес С.А. Опубл. 20.03.2000.
12. Патент RU № 105215 U1, СПК B24B 39/04. Устройство для упрочняющей поверхностной обработки цилиндрических деталей / Кропоткина Е.Ю., Корниенко А.А. Опубл. 10.06.2011.
13. Патент RU № 2124431 C1, СПК B24B 39/00. Станок для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических изделий / Зайдес С.А. Опубл. 10.01.1999.
14. Тудакова Н.М., Крайнов В.В. Дорн для поверхностной пластической деформации внутренних поверхностей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 3 (114). С. 150—154.
15. Щедрин А.В., Самойлов В.Б., Чихачева Н.Ю. Влияние геометрии инструмента на формирование очагов деформации в инновационных методах дорнования отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20. № 10 (238). С. 435—440.
16. Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 12—21.
17. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 2 (182). С. 68—74.
18. Вирт А.Э. Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 1 (115). С. 44—48.
19. Митрофанова К.С., Блюменштейн В.Ю. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 // Вестник КузГТУ. 2022. № 3. С. 4—12.
20. Qosimova Z. M., Rubidinov Sh.G. Influence of the Design of the Rolling Roller on the Quality of the Surface Layer During Plastic Deformation on the Workpiece // International journal on human computing studies. 2021. V. 3. Iss. 2. P. 257—263.
21. Паршин С.В. Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения. Екатеринбург, 2024. 68 с.
22. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород, 2006. 115 с.
23. Кожаринова Л.В. Основы теории упругости и пластичности. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 136 с.
24. Новожилов В.В. Теория упругости. СПб.: Политехника, 2010. 409 с.
25. Wildemann V., Lomakin E., Tretyakov M. Postcritical deformation of steels in plane stress state // Mechanics of Solids. 2014. № 1. P. 18—26.
26. Зайдес С.А., Минь Куан Хо. Зависимость напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей от маятникового воздействия секториального рабочего инструмента // Технология металлов. 2022. № 6. С. 24—34.

ВНИМАНИЕ! ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ!

При представлении статьи в редакцию необходимо соблюдать следующие условия для учета в системе РИНЦ:

- указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- библиографические ссылки давать **без ошибок** (название статьи, полное название журнала, год, том, номер издания, страницы).

При несовпадении представленных и учтенных в elibrary данных автора система на запросы НЕ отвечает, т.к. не находит этих данных на своем портале.

В этом случае редакция не принимает никаких претензий.

Контактное взаимодействие уплотненного шлифовального материала с поверхностью детали при финишной абразивной обработке

В.А. СКРЯБИН^{1*}, д-р техн. наук, проф.,

А.Г. СХИРТЛАДЗЕ², д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф.,

В.З. ЗВЕРОВЩИКОВ¹, д-р техн. наук, проф.

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», Москва, 127055, Российская Федерация

*E-mail: vs-51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-11-37-46

Статья поступила в редакцию 14.03.2025

Принята после доработки 21.04.2025

Принята к публикации 07.05.2025

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия абразивных частиц с поверхностями сложнопрофильных деталей. Приведены математические модели процесса абразивной обработки. Даны рекомендации по выбору соотношения диаметральных размеров деталей и эластичной оболочки камерного устройства.

Ключевые слова: абразивные частицы, сложнопрофильные поверхности, математические модели, абразивная обработка, детали, эластичная оболочка, камерное устройство.

Введение

Качество профиля деталей во многом определяют характеристики их рабочих поверхностей. Шлифование таких деталей традиционными методами часто трудноосуществимо, а иногда и невозможно. Поэтому метод их обработки является актуальной задачей. Данная задача реализуется путем обработки выше-

указанных деталей в условиях статически уплотненной абразивной среды [1–6].

На рис. 1, а цилиндрические изделия 1 закрепляются на оси 2 и помещаются в абразивную суспензию 3, находящуюся в специальном контейнере (камере) 4, в котором смонтирована цилиндрическая оболочка 5, изготовленная из специальной резины. Рабочая суспензия сжимается

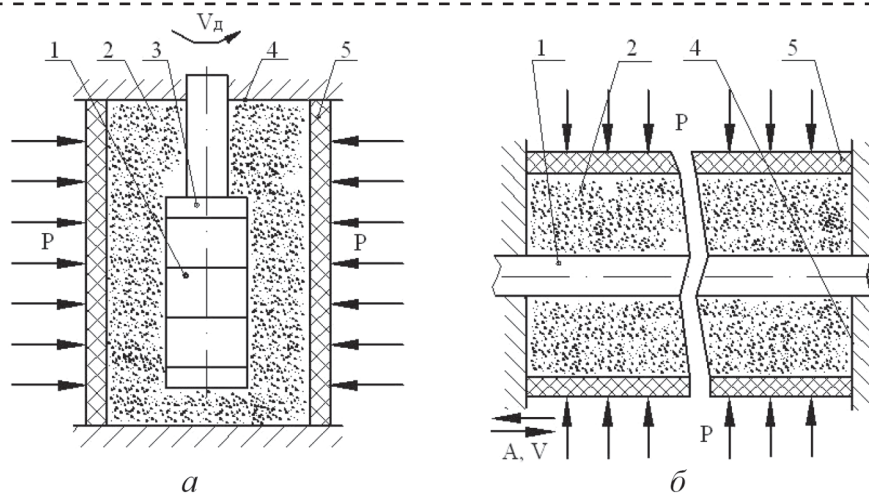


Рис. 1. Обработка деталей статически уплотненным абразивом:

а — обработка цилиндрических деталей; *б* — обработка плоских деталей

при подаче на периметр оболочки сжатого воздуха. Обработка происходит при вращении оси с деталями со скоростью V_d . На рис. 1, б при обработке плоская деталь перемещается со скоростью V_d .

При финишной абразивной обработке деталей типа тел вращения со сложным контуром поверхности мелкодисперсными незакрепленным абразивными частицами во время уплотнения сжатым воздухом через эластичную оболочку в специальной камере в съеме металла принимает участие достаточно большое количество абразивных зерен.

При обработке деталей статически уплотненной абразивной суспензией с глубиной резания до 1 мкм в процессе удаления материала участвуют микровыступы абразивных частиц.

Материалы и методы

Согласно проведенным экспериментам [1], при камерной обработке деталей по мере уменьшения их диаметров (при остальных одинаковых параметрах) интенсивность воздействия обрабатывающей среды на поверхность может как увеличиться, так и уменьшиться. Следует

отметить, что с увеличением давления при неизменности остальных параметров интенсивность воздействия обрабатывающей среды на поверхность может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Увеличение интенсивности воздействия обрабатывающей среды на деталь в обоих случаях может быть объяснено увеличением давления, с которым абразивные частицы воздействуют на поверхность. Уменьшение интенсивности воздействия обрабатывающей среды на деталь является следствием того, что с увеличением давления увеличивается вероятность проворота абразивных частиц относительно обрабатываемой детали [2].

В нашем случае при определении давления, действующего непосредственно на поверхность детали, согласно известным соотношениям теории упругости [3]:

$$U = \frac{1}{E} \left[(1-\nu) \cdot C \cdot R - (1+\nu) \cdot C_1 \cdot \frac{1}{R} \right];$$

$$\sigma_R = C + C_1 \cdot \frac{1}{R^2};$$

$$\sigma_\theta = C - C_1 \cdot \frac{1}{R^2},$$
(1)

где U — радиальное перемещение; E — модуль нормальной упругости; ν — коэффициент Пуассона; R — текущее значение радиуса; C , C_1 — произвольные постоянные; σ_R , σ_θ — радиальная и окружная компоненты напряжений соответственно.

Данные соотношения справедливы при условии, что объемные силы (силы инерции) равны нулю.

Произвольные постоянные определим при следующих граничных условиях:

$$(\sigma_R)_{R=R_1} = P,$$

где R_1 — радиус наружной образующей уплотненного абразивного слоя; P — давление, приложенное к эластичной оболочке.

Данное условие означает, что на поверхности контакта обрабатывающей среды с внутренней поверхностью эластичной оболочки давление равно давлению, прикладываемому к внешней поверхности эластичной оболочки сжатым воздухом:

$$U_{R=R_2} = 0,$$

где R_2 — радиус детали.

Это условие означает, что на поверхности контакта обрабатывающей среды с поверхностью детали перемещение обрабатывающей среды отсутствует.

При использовании данных условий будем иметь следующие произвольные постоянные:

$$C = P \left[1 - \frac{R_2^2}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]; \quad (2)$$

$$C_1 = P \left[\frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) компоненты напряжений определяются следующим образом:

$$\sigma_R = P \left[1 - \frac{R_2^2 \cdot \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right)}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = P \left[1 - \frac{R_2^2 \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right)}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]. \quad (5)$$

Для дальнейших расчетов потребуется осевая компонента напряжений, которая при плоской деформации может быть определена по следующей зависимости [3]:

$$\sigma_z = \nu \cdot (\sigma_R + \sigma_\theta). \quad (6)$$

Подставив (4) и (5) в (6), в результате преобразований получим:

$$\sigma_z = 2 \cdot P \cdot \nu \cdot \left[1 - \frac{R_2^2}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]. \quad (7)$$

Нормальное давление, действующее непосредственно на поверхность детали, можно получить из (5) при $R = R_2$:

$$P_2 = (\sigma_R)_{R=R_2} = P \left[1 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot R_1^2} \right]. \quad (8)$$

Построенные графики зависимостей $\sigma_R = f(R)$, $\sigma_\theta = f(R)$, $\sigma_z = f(R)$ приведены на рис. 2. Из анализа графических зависимостей видно, что при приближении к центру обрабатывающей среды радиальная компонента напряжения уменьшается, окружная увеличивается, а осевая остается неизменной.

Как уже отмечалось ранее, при $R = R_2$ радиальная компонента напряжения представляет собой нормальное давление, действующее непосредственно на поверхность детали. При увеличении этого давления происходит внедрение абразивных ча-

стиц в деталь на большую глубину. Так как деталь вращается, то возникает момент сил, стремящийся повернуть абразивную частицу. Чем больше глубина внедрения абразивной частицы в поверхность детали, тем больше величина момента, стремящегося повернуть эту частицу, и тем больше вероятность того, что абразивная частица будет перекашиваться относительно поверхности детали. Следует отметить, что с увеличением окружной и осевой компонент напряжений этого давления создается момент сил, удерживающий абразивную частицу от проворота, а прочность закрепления абразивных частиц в обрабатываемой среде увеличивается.

На основании вышеизложенного, а также анализируя графики (см. рис. 2), можно сделать следующие выводы. Наиболее благоприятные условия для обработки будут у деталей, радиальные размеры которых находятся в определенном соотношении с радиальным размером эластичной оболочки. В данном случае для представленных графических зависимостей соотношение радиусов детали и эластичной оболочки должно находиться в следующих пределах:

$$1 < \frac{R_1}{R_2} \leq 3,33.$$

При этом камерное устройство с определенным размером эластичной оболочки может эффективно использоваться для обработки деталей, размеры которых входят в указанный диапазон. При соотношении радиальных размеров, превышающих величину 3,33, увеличивается вероятность проворота абразивных частиц относительно поверхности детали, вследствие чего

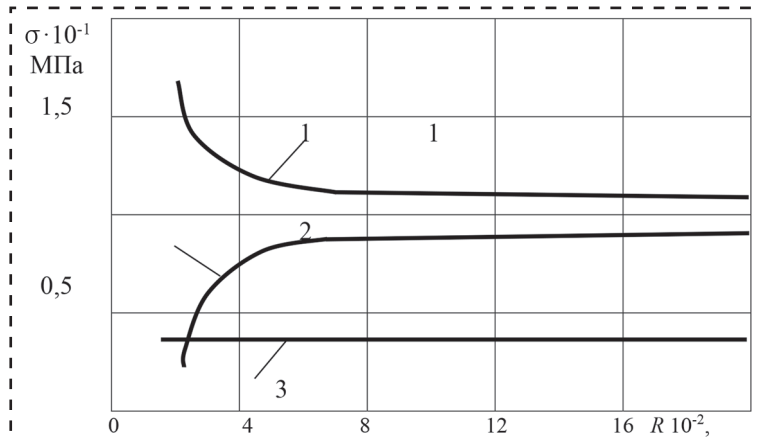


Рис. 2. Распределение компонент напряжений в уплотненной обрабатываемой среде:

1 — график зависимости $\sigma_R = f(R)$; 2 — график зависимости $\sigma_\theta = f(R)$; 3 — график зависимости $\sigma_z = f(R)$ (исходные данные: $v = 0,2$; $R_1 = 0,2$ м; $P = 0,1$ МПа; $R_2 = 0,02$ м; $R = 0,02-0,2$ м)

обработка детали практически прекращается. Дальнейшее увеличение давления приводит к тому, что увеличивается вероятность проворота абразивных частиц. С точки зрения технологии полирования деталей камерным способом наибольший интерес представляют компоненты напряжений, действующие на границе «поверхность детали—обрабатываемая среда». Соответствующие графические зависимости $P_2 = (\sigma_R)_{R=R_2} = f(R_2)$, $(\sigma_\theta)_{R=R_2} = f(R_2)$, $(\sigma_z)_{R=R_2} = f(R_2)$ приведены на рис. 3.

Из полученных графических зависимостей видно, что с уменьшением радиуса обрабатываемой детали все компоненты напряжений увеличиваются. Скорость увеличения радиальной компоненты напряжений (нормального давления, действующего на поверхность детали) больше по сравнению со скоростью увеличения окружной и осевой компонент напряжений. Следовательно, можно сделать вывод о том, что с уменьшением радиуса обрабатываемой детали при прочих неизменных условиях вероятность проворота абразивных частиц увеличивается. Это, в свою очередь, приводит к уменьше-

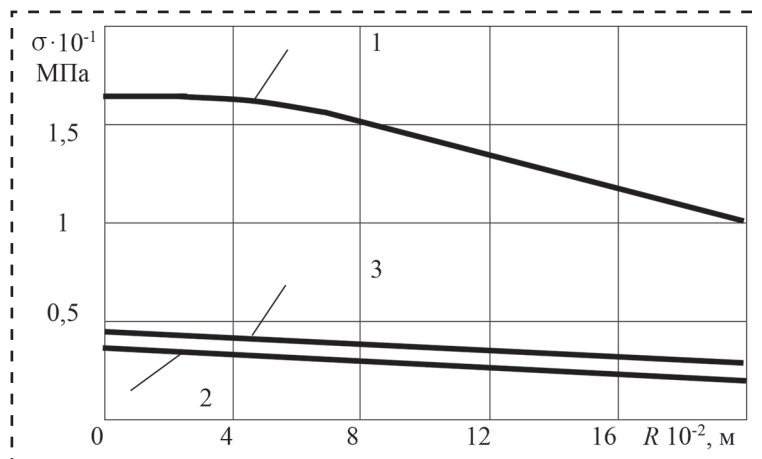


Рис. 3. Распределение компонент напряжений на границе «поверхность детали—обрабатывающая среда»:

1 — график зависимости $P_2 = (\sigma_R)_{R=R_2} = f(R_2)$; 2 — график зависимости $(\sigma_\theta)_{R=R_2} = f(R_2)$; 3 — график зависимости $(\sigma_Z)_{R=R_2} = f(R_2)$ (исходные данные: $\nu = 0,2$; $R_1 = 0,2$ м; $P = 0,1$ МПа; $R_2 = 0,02$ м; $R = 0,02—0,2$ м)

нию интенсивности съема материала при уменьшении радиуса обрабатываемой детали. Рассмотрим процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали более подробно.

Во-первых, определим момент сил, удерживающий абразивную частицу от проворота, и момент сил, стремящийся ее повернуть.

Момент сил, удерживающий абразивную частицу от поворота, может быть представлен в следующем виде:

$$M_1 = \frac{Z}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \cdot f_a \cdot K_1, \quad (9)$$

где Z — зернистость абразива; f_a — коэффициент межчастичного трения абразивных частиц (согласно [3, 4] этот коэффициент равен 0,213, причем для используемых давлений эта величина является постоянной); K_1 — коэффициент, характеризующий неучтенные параметры, влияющие на прочность закрепления абразивных зерен в конкретной обрабатывающей среде.

Момент сил, который стремится повернуть абразивную частицу, может быть определен следующим образом:

$$M_2 = \frac{Z}{2} \cdot P_2 \cdot f_d \cdot K_2, \quad (10)$$

где K_2 — коэффициент, определяющий неучтенные параметры, которые влияют на момент поворота, причем $K_1 \neq K_2$; f_d — коэффициент трения абразивной частицы с поверхностью детали.

В исследованиях [4] приводится следующая математическая зависимость для определения коэффициента трения f_d :

$$f_d = \frac{0,44 \cdot N^{1/2}}{\pi^{1/2} \cdot r_b \cdot HB^{1/2}}, \quad (11)$$

где N — нормальное давление, действующее на абразивную частицу (в нашем случае $N = P_2$); r_b — радиус внедряющего выступа абразивной частицы (при условном моделировании абразивных частиц сферами $r_b = Z/2$); HB — твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

С учетом принятых обозначений будем иметь:

$$f_d = \frac{0,88 \cdot P_2^{1/2}}{\pi^{1/2} \cdot z \cdot HB^{1/2}}. \quad (12)$$

Введем следующее обозначение:

$$M_1/M_2 = \lambda. \quad (13)$$

При $\lambda < 1$ абразивные частицы, контактирующие с поверхностью детали, будут проворачиваться, при $\lambda = 1$ абразивные частицы будут находиться в неустойчивом состоянии и при $\lambda > 1$ проворот абразивных частиц будет исключен.

Введем обозначение $K_1/K_2 = K$. Значение коэффициента K экспериментально может быть определено при $\lambda = 1$, при

одновременной обработке двух деталей разного диаметра или одной ступенчатой детали. Необходимо подобрать такое давление, чтобы абразивные частицы скользили по поверхности большого радиуса и перекатывались по поверхности меньшего радиуса.

Следующим шагом уточним зависимости (5, 6, 8), которые были получены при допущении, что обрабатывающая среда представляет собой сплошное тело. Для этого введем поправку, учитывающую зернистость обрабатываемой среды.

Аналогичным способом с исследованиями [6—9], но более упрощенно определим количество абразивных частиц зернистости Z , которые могут быть расположены на поверхности площади S :

$$n = \frac{4A \cdot S}{\pi \cdot Z^2}, \quad (14)$$

где n — число абразивных зерен, контактирующих с поверхностью детали площадью S ; A — коэффициент, характеризующий марку абразивного материала, максимальное числовое значение которого при плотной упаковке абразивных частиц в соответствии с исследованиями [1, 6] составляет 0,9069.

Компоненты напряжений σ_R , σ_θ , σ_z действуют по единичным площадкам. Количество абразивных зерен, которые могут быть расположены на таких площадках с учетом (14), можно определить следующим образом:

$$n_1 = \frac{4A}{\pi \cdot Z^2}. \quad (15)$$

Учитывая (15), компоненты напряжений σ_R , σ_θ , σ_z могут быть заменены соответствующими усилиями, которые будут возникать в обрабатываемой среде и на поверхности детали в зависимости от зернистости абразива.

Подставив полученные зависимости в формулу (13), которая имеет смысл при $R = R_2$, после преобразований получим:

$$\lambda = \frac{\left[\left\{ 1 - \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 + [(1+\nu)/(1-\nu)] \cdot R_1^2} \right\} + 2\nu \left\{ 1 - \frac{R_2^2}{R_2^2 + [(1+\nu)/(1-\nu)] R_1^2} \right\} \right] \cdot (A \cdot HB)^{1/2} \cdot f_a \cdot K}{0,44 \cdot P^{1/2} \cdot \left[1 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 + [(1+\nu)/(1-\nu)] \cdot R_1^2} \right]^{3/2}}. \quad (16)$$

Для того чтобы воспользоваться зависимостью (16), сначала необходимо определить значение коэффициента K . С этой целью была изготовлена ступенчатая деталь с радиусами $R'_2 = 0,01$ м и $R''_2 = 0,012$ м твердостью 230 *HB*. Обработка детали производилась в камере при радиусе эластичной оболочки $R_1 = 0,035$ м. Остальные значения величин, входящих в формулу (16), были следующими: $\nu = 0,2$; $f_a = 0,213$; $A = 0,9069$. При давлении, прикладываемом к эластичной оболочке $P = 0,15$ МПа, на поверхности детали радиуса $R'_2 = 0,01$ м следы от скольжения абразивных частиц полностью отсутствовали; в то же время на поверхности $R''_2 = 0,012$ м процесс обработки протекал нормально. После расчетов по формуле (16) было получено значение коэффициента K , его численная величина получилась равной 0,030305.

После определения коэффициента K производился расчет по выражению (16).

По зависимости (16) были проведены расчеты при следующих исходных данных: $\nu = 0,2$; $f_a = 0,213$; $A = 0,9069$; $K = 0,030305$; $R_1 = 0,2$ м; $HB = 0—600$; $P = 0,01—0,6$ МПа; $R_2 = 0—0,2$ м. Результаты расчетов приводятся в виде объемного графика на рис. 4.

На графике нанесена поверхность γ , которая делит его на две части. Слева от поверхности γ коэффициент λ меньше 2, справа больше 1.

Приведенный график дает наглядное представление о технологических возможностях камерного способа обработки уплотненным абразивом с точки зрения характера взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью детали. Данный график позволяет определить максимально допустимое давление, которое может быть приложено к эластичной оболочке при камерной обработке деталей заданной твердости и радиуса на установ-

ке с заданным размером эластичной оболочки.

Из анализа проведенной графической зависимости видно, что определенное изменение характера взаимодействия абразивных частиц с поверхностью детали может быть достигнуто путем изменения соотношения R_2/R_1 .

Наиболее благоприятными будут условия обработки деталей, размеры которых незначительно отличаются от размеров эластичной оболочки. Это можно обеспечить путем использования для обработки деталей различных диаметров камерных устройств с широким диапазоном диаметральных размеров эластичной оболочки, что с практической стороны не вызывает никаких затруднений, и, кроме того, путем применения дозированной загрузки обрабатываемой среды в рабочую камеру.

Необходимо отметить, что на характер взаимодействия абразивных частиц с поверхностью детали также оказывает влия-

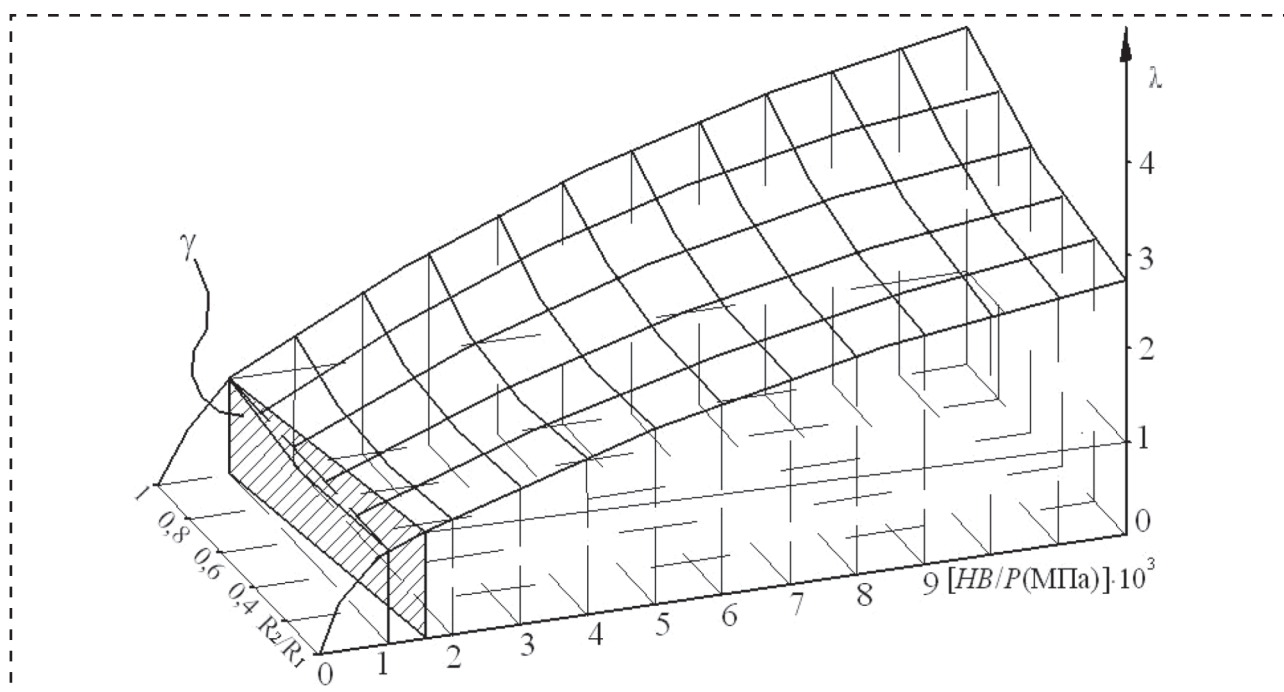


Рис. 4. График зависимости $\lambda = f(R_2/R_1, HB/P)$. Исходные данные: $\nu = 0,2$; $f_a = 0,213$; $A = 0,9069$; $K = 0,030305$; $R_1 = 0,2$ м; $HB = 0—600$; $P = 0,01—0,6$ МПа; $R_2 = 0—0,2$ м

ние соотношение твердости обрабатываемого материала и давления, подводимого к эластичной оболочке. При этом с увеличением твердости обрабатываемого материала уменьшается вероятность проворота абразивных частиц относительно поверхности детали при постоянном давлении, приложенном к эластичной оболочке камерного устройства.

Следует подчеркнуть, что в зависимости от соотношения R_2/R_1 и величины твердости обрабатываемого материала можно определить верхний допустимый предел давления, которое может быть приложено к эластичной оболочке, не вызывая проворота абразивных частиц. Как показали практические результаты, для надежного исключения возможности проворота абразивных частиц относительно поверхности детали значение коэффициента λ должно находиться в диапазоне 1,2—1,5. После этого подбирают зернистость абразива, который сможет обеспечить при данном давлении P с учетом зависимости (8) получение требуемой шероховатости поверхности детали. Если требуемая шероховатость поверхности может быть достигнута абразивным материалом нескольких зернистостей, то предпочтение следует отдать абразивному материалу с более крупной фракцией зерен, что обеспечит высокую производительность процесса обработки.

Следует подчеркнуть, что определение максимального допустимого давления, которое может быть приложено к эластичной оболочке, позволяет оптимизировать процесс камерной обработки с учетом следующих параметров: радиуса эластичной оболочки устройства (объема загрузки обрабатываемой среды в рабочую камеру); радиуса и физико-механических свойств поверхности детали; зернистости и физико-механических свойств обрабатыва-

ющей среды. В то же время определенное ограничение величины давления делает необходимым проведение дальнейших исследований в плане оптимизации рабочих параметров обработки для получения требуемой шероховатости поверхности детали, так как камерный способ обработки является финишной операцией.

Как уже отмечалось, камерный способ абразивной обработки может быть использован для получения шероховатости поверхности по параметру $R_a = 0,05$ мкм на самых различных деталях типа дисков, втулок, кулачков, плоских деталей.

Проведенными исследованиями установлено, что при обработке деталей незакрепленным абразивом, уплотненным в камере статическим давлением сжатого воздуха через эластичную оболочку, съем материала с поверхности осуществляется в основном в результате микрорезания микропрофилем и субмикропрофилем абразивных частиц. Микрорезание вершинами абразивных зерен осуществляется до тех пор, пока частицы сохраняют стабильное положение по отношению к поверхности обрабатываемой детали.

Если учесть предложенную теоретическую модель абразивного воздействия частиц обрабатываемой среды на поверхность детали и практически используемые давления уплотненного абразива на поверхность, то можно предположить, что микро- и субмикропрофили должны производить съем материала за счет микро- и субмикро-резания [1, 2, 5, 6]. Очевидно, что при этом будет иметь место определенная зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от параметров микро- и субмикропрофиля и размеров абразивных частиц.

При более высоком контактном давлении в фазу микрорезания будут всту-

пать и вершины абразивных частиц. Следовательно, можно ожидать, что будет резко меняться зависимость шероховатости формируемой поверхности от зернистости абразива. Исследования этих переходных процессов представляют большой теоретический и практический интерес, т.к. их результаты должны учитываться при выборе технологических режимов и условий обработки деталей камерным способом.

Можно предположить, что наиболее эффективно режущие способности абразивных частиц будут использоваться при микрорезании их вершинами, так как в этом случае микро- и субмикропрофиль также будут оказывать абразивное воздействие в форме микрорезания (субмикрорезания). Поэтому представляется целесообразным осуществлять выбор основных технологических параметров обработки незакрепленным абразивом исходя именно из этого условия. Необходимо принимать во внимание то, что абразивные частицы должны формировать на поверхности детали требуемую шероховатость [10–13].

Выводы

Проведенные теоретические исследования показали, что на качество формируемой поверхности детали при ее камерной обработке оказывают влияние следующие параметры: давление, действующее на эластичную оболочку, зернистость абразива, твердость материала обрабатываемой детали, соотношение диаметральных размеров детали и эластичной оболочки.

Исследованиями установлено, что при определенных соотношениях вышеуказанных параметров резко снижается производительность обработки. Это выражается в том, что поверхность детали практически

не обрабатывается. Можно предположить, что происходит перекатывание абразивных частиц относительно поверхности детали.

Чтобы избежать этого, необходимо выбрать соответствующим образом давление, прикладываемое к эластичной оболочке камерного устройства. Следует обеспечить такую величину усилия, прижимающего абразивные частицы к поверхности детали при ее вращении, чтобы она не превышала определенной величины, вызывающей проворот абразивных частиц.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организаций. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. Скрыбин В.А. Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом. Пенза: Изд-во ПВАИУ, 1992. 120 с.
2. Патент 2748919(РФ), МКИ: В24В 31/104. Способ абразивной обработки плоских поверхностей деталей / В.А. Скрыбин, В.О. Фомичев. Оpubл. 01.06.21. Бюл. № 16.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Д.Ж. Теория упругости М.: Наука, 1985. 576 с.
4. Скрыбин В.А. Специальные конструкции абразивных инструментов // Технология металлов. 2019. № 11. С. 35–40.
5. Скрыбин В.А., Свечникова Г.И. Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22.
6. Скрыбин В.А., Артемов И.И. Совершенствование технологии и оборудования при камерной обработке деталей незакрепленным шлифовальным материалом // Ремонт, восстановление, модернизация. 2025. № 3. С. 13–20.
7. Скрыбин В.А., Схиртладзе А.Г., Рыбаков Ю.В. Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Технология металлов. 2003. № 2. С. 16–17.

8. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами. Монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 240 с.
9. **Пат. 2572684**, МПК В24В31/104 «Способ центробежной обработки внутренних поверхностей мелко-размерных деталей» / В.З. Зверовщиков, А.Е. Зверовщиков, А.В. Стешкин; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. № 2014128140/02; заявл. 09.07.2014; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
10. **Мартынов А.Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Монография. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.
11. **Скрябин В.А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 3. С. 18—22.
12. **Корнараки В.В., Доманский Р.А.** Зависимость коэффициента трения и угла естественного откоса некоторых шлифовальных материалов от влажности // Абразивы: Экспресс-информация. 1981. № 9. С. 16—19.
13. **Skhirtladze A.G., Skryabin V.A.** Technology of Repairing Abrasive Tools. Russian Metalurgy (Metally). 2017. V. 13. P. 1176—1181.

Требования к статьям для журналов, включенных в Перечень ВАК

Обязательное указание в каждой статье:

- УДК
- Название статьи
- Аннотация
- Ключевые слова
- Информация об авторах: ученая степень, наименование организации
- E-mail
- Наличие пристатейных библиографических списков у всех статей в формате, установленном журналом из числа предусмотренных действующим ГОСТом

Аннотации статей, ключевые слова, полная информация об авторах должны быть указаны на русском и английском языках.

ООО «Наука и технологии»

Учредитель журнала ООО «Наука и технологии».

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации № 017187 от 16 февраля 1998 г.

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО «Сид».

Сдано в набор 07.09.2025. Подписано в печать 21.10.2025.

Формат 60×88 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5,86. Уч.-изд. л. ?,?. Тираж 150 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Сид».

ЛИЦЕНЗИОННЫЙ ДОГОВОР

о передаче исключительного права на использование произведения

г. Москва

«___» _____ 20__ г.

Автор(ы) _____, именуемый(е) в дальнейшем «Лицензиар», с одной стороны и ООО «Наука и технологии», в лице генерального директора Карцева Дмитрия Владимировича, действующего на основании Устава, именуемое в дальнейшем «Лицензиат», с другой стороны, а вместе именуемые «Стороны», заключили настоящий договор о нижеследующем:

1. Предмет договора

1.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату безвозмездно право использования оригинального произведения в установленных настоящим договором пределах. Произведение должно быть проверено лицензиаром на плагиат.

1.2. Объектом авторских прав, право использования которого предоставляется по настоящему договору, является произведение _____.

1.3. Лицензиар предоставляет Лицензиату право использовать произведение следующим образом:

1.3.1. воспроизведение произведения или отдельной его части на русском языке в любой материальной форме, в том числе на бумажном и электронном носителях в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.2. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на русском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.3. доведение произведения или отдельной его части до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.4. право на перевод произведения на английский язык;

1.3.5. воспроизведение произведения или отдельной его части на английском языке в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.6. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на английском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.7. доведение произведения или отдельной его части до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.8. сублицензирование (выдача разрешения) полученных прав по настоящему договору в целом или частичном виде для перевода, издания, распространения и доведения до всеобщего сведения на английском языке.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. Лицензиат может использовать произведение только в пределах тех прав и теми способами, которые предусмотрены настоящим лицензионным договором;

2.2. В течение срока действия лицензионного договора Лицензиар обязан воздерживаться от каких-либо действий, способных затруднить осуществление Лицензиатом предоставленного ему права использования произведения в установленных настоящим договором пределах.

3. Срок действия договора

3.1. Срок действия настоящего договора составляет 5 (пять) лет.

3.2. В случае прекращения исключительного права лицензионный договор прекращается.

4. Ответственность по договору

4.1. За использование произведения способом, не предусмотренным настоящим договором, либо по прекращении действия договора, либо иным образом за пределами прав, предоставленных договором, Лицензиат несет ответственность за нарушение исключительного права на произведение, предусмотренную Гражданским Кодексом РФ и другими нормативно-правовыми актами.

4.2. Лицензиар гарантирует наличие у него предоставляемых по настоящему договору исключительных прав на произведение.

5. Заключительные положения

5.1. Настоящий договор вступает в силу с момента его подписания.

5.2. Приложения, дополнения к договору действительны и составляют неотъемлемую часть настоящего Договора лишь в том случае если они совершены в письменной форме и подписаны обеими сторонами.

5.3. Стороны вправе использовать для передачи документов, относящихся к настоящему договору, факсимильную, почтовую и электронную почтовую связь, указанную в реквизитах сторон. Переданные с использованием факсимильной или электронной почтовой связи документы, относящиеся к настоящему договору, заверенные печатями и подписями уполномоченных лиц, имеют юридическую силу до момента получения оригиналов указанных документов.

5.4. Настоящий договор составлен в двух аутентичных экземплярах, по одному для каждой стороны.

5.5. Во всем, что не предусмотрено настоящим договором, Стороны руководствуются действующим законодательством РФ.

5.6. Автор (ы), подписывая настоящий Договор соглашается на предоставление Лицензиату согласия и на обработку его персональных данных.

Исполнитель гарантирует защиту персональных данных Заказчика, предоставленных для исполнения настоящего договора (в том числе копий паспортных данных, адресов и т. п., включая диплома Заказчика). Исполнитель не вправе передавать персональные данные Заказчика третьим лицам без согласия Заказчика, за исключением случаев, прямо предусмотренных действующим законодательством РФ.

Лицензиат вправе хранить персональные данные Заказчика удобным ему способом, а также осуществлять их обработку для целей исполнения условий настоящего договора.

6. Реквизиты и подписи Сторон

Лицензиар

Ф. _____

И. _____

О. _____

Пасп., серия _____ № _____

выдан _____

Адрес _____

_____/_____/_____

Лицензиат

ООО «Наука и технологии»

ИНН 7728161750, КПП 771901001

Юр. Адрес/Адрес доставки: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60

Тел./факс: (495)988-98-65; E-mail: admin@nait.ru, dv@nait.ru

р/сч 40702810806010000025 в Филиале Центрального банка

ВТБ (ПАО) г. Москва БИК 044525411

к/сч 30101810145250000411, ОГРН 102773952346

Генеральный директор _____ / Карцев Д.В. /

ПАМЯТКА АВТОРУ

ООО «Наука и технологии» принимает к рассмотрению оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, отвечающие профилю и тематике журнала для публикации.

1. Статью в электронном виде следует направить на электронную почту издательства **admin@nait.ru** с указанием названия журнала в двух форматах: DOC и PDF. После конвертирования файла в формат PDF убедитесь, что формулы и рисунки отображаются правильно.

2. Один экземпляр статьи, напечатанный на лазерном принтере на одной стороне стандартного листа формата А4, необходимо направить на адрес редакции: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60. Статья должна быть подписана всеми авторами.

Статью необходимо сопроводить следующими оригиналами документов: лицензионным договором, подписанным всеми авторами (лицензионный договор должен быть распечатан на одном листе с оборотом), и актом к нему (см. сайт <http://www.nait.ru/autors/index.php>); актом экспертизы (для граждан РФ); справкой с результатами проверки на отсутствие плагиата; сведениями об авторах.

3. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста (до 25 с. для обзоров) и 6—8 рис.

Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Части статьи располагают в следующей последовательности:

- а) индекс УДК;
- б) название статьи;
- в) инициалы и фамилии всех авторов, ученые степени и звания всех авторов. Звездочкой (*) следует отметить автора, уполномоченного работать с редакцией, и привести его контактные данные: e-mail, телефон;
- г) место работы каждого автора (полное название организации, город, индекс, страна). Для учета в системе РИНЦ указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- д) краткая аннотация (не более 5—7 строк) с перечислением ключевых слов;
- е) вводная часть с обоснованием актуальности и изложением цели работы (не более 1 страницы);
- ж) основной текст, который при необходимости следует разделять на разделы и подразделы (методика эксперимента, экспериментальные результаты, их обсуждение);
- з) выводы, в которых по мере возможности должно быть указано практическое применение результатов;
- и) список литературы;
- к) список подписанных подписей, таблицы, рисунки (в такой последовательности). Все включают в общую нумерацию страниц статьи.

Материалы пунктов б—д необходимо представить и на **английском языке**.

4. Набирать текст необходимо в **MS Word**, используя стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**, размер 14, через **полтора** интервала. Поля со всех сторон 25 мм. В числах с десятичными дробями целое число отделяют от дроби запятой, а не точкой.

5. Для набора формул следует использовать редакторы формул **Math Equation** или **Math Type**. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Знак корня (радикал) следует писать так, чтобы его горизонтальная черта полностью накрывала все подкоренное выражение. Русские и греческие буквы в формульном тексте набирают прямым шрифтом, латинские — курсивным, за исключением математических обозначений, а также обозначений химических элементов, которые набирают прямым шрифтом.

6. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна быть в системе СИ.

7. Элементы **списка литературы** должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Для книг указывается место издания, издательство, год издания и количество страниц. Для статей — полное название журнала или сборника, год, том, номер выпуска, страницы.

8. Графический материал нужно предоставить в форматах **jpeg** или **tiff** с разрешением не менее **300 dpi** только в черно-белом изображении. Рисунки должны быть четкими и не требовать перерисовки.

Каждый рисунок нужно распечатать на отдельной странице, указать его порядковый номер, авторов и название статьи.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

Уважаемые читатели!

Открыта подписка на ежемесячный производственный,
научно-технический и учебно-методический журнал

«Технология металлов»

на 2026 год

Журнал распространяется только по подписке

Подписная цена журнала на I полугодие — **59 100** руб.

Стоимость одного номера журнала — **9850** руб., НДС не облагается

***Вы можете оформить подписку с любого номера журнала
до 25-го числа предподписного месяца***

- ➔ на сайте издательства **<http://www.nait.ru>** открыта электронная подписка на полнотекстную версию журнала с мая 2009 г.;
- ➔ **по безналичному расчету:** ООО «Наука и технологии» (ИНН 7728161750, КПП 771901001), р/с № 40702810806010000025, филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве, БИК 044525411, к/с № 30101810145250000411.

В графе «Назначение платежа» укажите: «Подписка на журнал «Технология металлов» на (срок)». Укажите адрес, ИНН, название организации (или Ф.И.О. получателя), телефон.

Только при подписке в редакции или по безналичному расчету подписная цена журнала включает и стоимость пересылки.

- ➔ по каталогу периодических изданий «Урал-пресс» на сайте **www.ural-press.ru**;
- ➔ **по Объединенному каталогу**, подписной индекс **29077**, а также на сайтах **www.pressa-rf.ru** или **www.akc.ru**. В отделе продаж на сайте по e-mail: **podpiska@pressa-rf.ru** или по тел.: **+7 (495) 631-62-54**.

Редакция журнала предоставляет вам возможность опубликовать свои материалы о новых научных и технических разработках и достижениях, а также об опыте организации производства.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

*По вопросам формирования редакционного портфеля
обращайтесь по адресу: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60
Тел./факс: +7 (499) 995-45-23, тел.: +7 (499) 995-45-22;
e-mail: admin@nait.ru, prmi79@mail.ru*

*По всем вопросам подписки, распространения и размещения рекламных материалов
обращайтесь по адресу:*

*105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60
Тел./факс: +7 (495) 223-09-10, +7 (499) 995-45-23.
E-mail: market@nait.ru*

