

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 621.785.5:621.983.07

ПОЗДНЯКОВ
Евгений Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ
ОТДЕЛОЧНЫХ ПУАНСОНОВ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКИ
ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ
С ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».

Научный
руководитель

Степанкин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-механик ООО «ЭлитПартнер»

Официальные
оппоненты

Тумилович Мирослав Викторович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск;

Григорчик Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится «17» апреля 2026 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря +375 (29) 778-84-65, e-mail: cadoxa.m@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «13» марта 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
канд. техн. наук, доцент



Садоха М. А

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на промышленных предприятиях Республики Беларусь количество мелкогабаритного холодновысадочного инструмента для изготовления метизов превышает 70 тыс. шт. в год. Традиционно они изготавливаются из инструментальных высоколегированных сталей, содержащих такие сильные карбидообразующие элементы, как Cr, W, Mo, V и др. Высокое содержание углерода обеспечивает формирование мартенситно-аустенитной матрицы с крупными первичными карбидами. Из-за различий свойств с металлической матрицей они являются концентраторами напряжений, что приводит к формированию трещин на рабочей поверхности инструмента, скалыванию мелких элементов гравюры и быстрому выходу инструмента из строя. Это, в совокупности с высокой стоимостью и низкой технологической обрабатываемостью инструментальных сталей, диктует необходимость поиска альтернативных решений.

Во многих случаях равноценную замену отмеченным сплавам обеспечивают конструкционные низколегированные стали с поверхностным упрочнением. Науглероживание конструкционных сталей позволяет сформировать градиент свойств по сечению с удовлетворительной износостойкостью поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины. Данный подход широко востребован при изготовлении зубчатых колес, шестерен, кулачковых валов, пальцев и др. износостойких изделий. Однако традиционно цементуемые стали после всего цикла термодиффузионного упрочнения имеют низкую прочность сердцевины, что сказывается на работоспособности изделий, работающих при напряжениях свыше 1000 МПа. Повышение прочности сердцевины обеспечивается за счет применения среднеуглеродистых легированных сталей. Установление влияния структуры на зависимости изнашивания термодиффузионно-упрочненных слоев конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей позволило сформулировать практические рекомендации по импортозамещению дорогостоящих инструментальных высоколегированных сталей, не производимых в Республике Беларусь, при подборе сплава для ответственных деталей штампового инструмента со сложнопрофильной рабочей поверхностью.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585, в частности, пункту 8 «Новые материалы для промышленности, медицины и строительства, наукоемкие технологии их производства. Металлургические и литейные процессы» и на 2016–2020 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Бела-

речь от 12.03.2015 № 190, в частности, п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии». Работа выполнялась в рамках ряда НИР:

- задание 4.1.07 «Технологическая регламентация направленного структурообразования материалов деталей машин для увеличения их наработки на отказ по критерию контактной выносливости» (ГР20141243, 2014–2015 гг) ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Материалы в технике» на 2013–2015 годы;

- задание 3.1.11 «Механизм и закономерности контактного изнашивания легированных конструкционных сталей после их объемного и поверхностного упрочнения» (ГР20192467, 2019–2020 гг) ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материалы в технике» на 2016–2020 годы;

- отдельное задание Министерства образования Республики Беларусь «Техническое обоснование применения экономно-легированных сталей с диффузионно-упрочненным слоем для изготовления холодновысадочного инструмента и технологической оснастки» № ГР 20131081 (2013–2014 гг.);

- грант Министерства образования Республики Беларусь «Разработка методики оценки наработки на отказ деталей машин, работающих в условиях пульсирующей контактной нагрузки» № ГР 20130212 (2013 г.).

Цель и задачи исследования. *Целью* работы является разработка технологии упрочнения отделочных пуансонов для холодной высадки головок метизов с наличием элементов гравюры толщиной не более 2 мм в сечении из конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей с термодиффузионным упрочнением с повышенной стойкостью по сравнению с пуансонами из высоколегированной инструментальной стали.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие *задачи*:

– исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) отделочных пуансонов со сложной формообразующей поверхностью;

– изучить особенности изнашивания инструментальных сталей, применяемых для изготовления инструмента, работающего в условиях воздействия пульсирующих контактных нагрузок;

– определить технологическую пластичность инструментальных и конструкционных сталей;

– установить влияние вида и режимов химико-термической обработки (ХТО) на структурообразование и особенности изнашивания термодиффузионно-упрочненных слоев конструкционных улучшаемых сталей;

– разработать технологические рекомендации по замене инструментальных высоколегированных сталей конструкционными улучшаемыми сталями с термодиффузионно-упрочненными слоями для изготовления отделочных пуансонов.

Объект исследования – термодиффузионно-упрочненные слои на мелкогабаритных отделочных пуансонах.

Предмет исследования – структура, фазовый состав, механические и эксплуатационные свойства термодиффузионно-упрочненных слоев на конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталях.

Научная новизна.

1. Установлено, что при воздействии циклических контактных напряжений (1300 ± 65 МПа) в условиях малоциклового усталости, характерных для работы холодновысадочного инструмента, износостойкость термоупрочненной стали У8А, вследствие отсутствия в ней крупных первичных карбидов, соответствует износостойкости высокохромистой стали Х12М и превышает износостойкость стали 9ХС.

2. Изучены закономерности структурообразования при науглероживании конструкционных улучшаемых сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4, не относящихся к классу цементуемых. Установлено, что увеличение длительности цементации с 8 до 12 часов приводит к повышению доли карбидной фазы с 15 об. % до 40 об. % в слоях стали 40Х, с 10 об. % до 15 об. % в слоях стали 35ХГСА и с 30 об. % до 40 об. % в слоях стали 42CrMoS4. Подтверждено, что дополнительное легирование сталей кремнием и марганцем уменьшает объемную долю карбидной фазы в цементованных слоях и способствует их гомогенизации. Подтверждено, что повышение содержания кремния снижает количество углерода на поверхности и толщину заэвтектоидной зоны, а также уменьшает размеры частиц карбидов и увеличивает микротвердость поверхности.

3. Впервые установлены зависимости усталостного изнашивания термодиффузионно-упрочненных слоев сталей 35ХГСА, 40Х и 42CrMoS4 от их структурного состояния и режимов химико-термической обработки. Показано, что высокую износостойкость имеют науглероженные слои стали 35ХГСА после проведения 12-часовой и стали 40Х после 8-часовой цементации, структура которых включает мартенсит, до 15 об. % избыточных карбидов с размером частиц до 10 мкм, аустенит (10–17 об. %), а также содержащих до 1,67 мас. % углерода. Установлено, что увеличение содержания углерода в цементованных слоях сталей с $\geq 1,8$ мас. % приводит к образованию более 30 об. % крупных (> 10 мкм) карбидов, снижающих сопротивление сплавов усталостному разрушению. На основании полученных результатов предложены режимы термодиффузионной обработки отделочных пуансонов с мелкими элементами гравюры (толщиной до 2 мм в сечении), изготавливаемых из конструкционных улучшаемых сталей, обеспечивающих повышение в 2,7–3,2 раза износостойкости по сравнению с пуансонами, традиционно изготавливаемыми из высоколегированной инструментальной стали Х12М.

4. Исследовано влияние обработки холодом, проведенной после закалки, на структуру и износостойкость термодиффузионных слоев улучшаемых сталей 35ХГСА и 40Х. Установлено, что дополнительное охлаждение сталей до температур ниже температуры конца мартенситного превращения понижает их износостойкость в 1,0–1,5 раза за счет уменьшения количества γ -

фазы в поверхностных слоях стали 35ХГСА на 14–20 % и для стали 40Х – на 41–56 %.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния отделочных пуансонов, позволившие установить характер распределения напряжений на рабочих поверхностях и определить, что максимальные эквивалентные напряжения на поверхности пуансона для формирования крестообразного шлица в головке винта и самореза достигают 1760 МПа, для маркировочного пуансона – 1395 МПа, а зонами их локализации являются элементы гравюры, представляющие собой кромки пересекающихся формообразующих поверхностей.

2. Экспериментальные результаты исследования влияния циклических контактных напряжений при амплитуде 1300 ± 65 МПа в условиях малоциклового усталости и обработки холодом на износостойкость термообработанных сталей У8А и 9ХС, позволившие установить более высокую износостойкость стали У8А по сравнению со сталью 9ХС, а также сохранение периода высокой износостойкости обработанной холодом стали 9ХС и уменьшение его для стали У8А.

3. Зависимости влияния структурного состояния на технологическую пластичность инструментальных сталей Х12М, У8А и 9ХС, подвергнутых термоциклическому отжигу, и конструкционных сталей 40Х и 35ХГСА в состоянии поставки и после изотермического отжига, позволившие установить, возможность использования сталей 40Х и 35ХГСА для формирования рабочей поверхности пуансонов и головок метизов с мелкими элементами гравюры (толщиной до 2 мм в сечении) за один технологический переход, что позволяет увеличить производительность и уменьшить трудоемкость изготовления пуансонов по сравнению со случаем изготовления пуансонов из высоколегированной стали Х12М.

4. Результаты исследования влияния режимов термодиффузионного упрочнения, включающего проведение цементации или нитроцементации с последующей термообработкой и обработку холодом, на структуру и износостойкость сталей 40Х и 35ХГСА, а также проведение цементации с последующей термообработкой на структуру и износостойкость стали 42CrMoS4, позволившие установить, что параметрами структуры, обеспечивающими максимальную износостойкость в условиях малоциклового усталости при напряжениях амплитудой 1300 ± 65 МПа, обладают цементованные слои, не подвергнутые обработке холодом, состоящие из мартенсита, не более 15 об. % избыточных карбидов размером до 10 мкм., остаточного аустенита – 10 об. % в стали 35ХГСА и 17 об. % в стали 40Х, а также углерода на поверхности не более 1,67 мас. %.

Личный вклад соискателя. Вклад автора в диссертационную работу заключается в постановке задач исследований, разработке методик экспериментов, их проведении, анализе и интерпретации полученных результатов, разработке рекомендаций по замене высоколегированной инструментальной стали

X12M на конструкционные среднеуглеродистые низколегированные стали 35ХГСА и 40Х с термодиффузионным упрочнением поверхности, компьютерном моделировании условий работы отделочных пуансонов. Работа выполнена под руководством кандидата технических наук, доцента Степанкина И. Н., вместе с которым определены тема, цель и задачи диссертационных исследований. Соавторы научных публикаций, результаты которых вошли в диссертацию, принимали участие в обсуждении полученных результатов исследований и подготовке публикаций (кандидат технических наук, доцент Романенко Д. Н., кандидат технических наук, доцент Куис Д. В.); при проведении экспериментальных исследований по определению фазового состава и получении изображений сканирующей электронной микроскопией (научный сотрудник Кудрицкий В. Г.).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований представлены и обсуждались на: XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции «МИКМУС–2014» (г. Москва, 2014); VI МНТК «Современные автомобильные материалы и технологии» (г. Курск, 2014); IX, X, XI, XII, XIV МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019); 31-ой МНТК «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (г. Минск, 2015); 32-ой МНТК «Технология–оборудование–инструмент–качество» (г. Минск, 2016); МНТК «Полимерные композиты и трибология» (г. Гомель, 2015); XIV и XXI МНТК «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, 2014, 2021); XIV МНТК «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2022); МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2014); VIII и IX МНТК «Беларусь в современном мире» (г. Гомель, 2015, 2016); V Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2018» (г. Минск, 2018); 7-ой МНПК «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра» (г. Гомель, 2023); I МНПК «Инновационное станкостроение, технологии и инструмент» (г. Гомель, 2023); XX Всероссийская НПК «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (г. Старый Оскол, 2023). Результаты диссертации прошли производственную апробацию и внедрены на предприятиях ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» и ООО «Хорда-Гидравлика», в также в образовательный процесс УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого».

Опубликование результатов диссертации. Результаты исследований опубликованы в 26 научных работах, в том числе в 10 статьях в журналах и сборниках, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 1 статье в сборнике научных трудов, 10 статьях в сборниках материалов конференций и 4 тезисах докладов. По результатам исследований получен 1 патент на полезную модель Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 128 наименований и 10 приложений, содержит 91 рисунок, 13 таблиц и изложена на 137 страницах машинописного текста.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность темы и необходимость решения исследовательских задач для усовершенствования технологии изготовления отделочных пуансонов для холодной высадки головок метизов. Отмечена важность данных исследований с позиции импортозамещения.

В первой главе приведен общий анализ способов объемного и поверхностного упрочнения инструментальных и конструкционных сталей с целью повышения их свойств при работе в условиях воздействия на его поверхность циклических контактных напряжений, выявлены преимущества и недостатки различных способов упрочнения. Показано, что инструментальные стали удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к холодновысадочному инструменту. Их недостатками являются дефицитность из-за отсутствия производства на территории РБ, высокая стоимость и повышенная трудоемкость при изготовлении сложнопрофильных гравюр штамповой оснастки. Выявлено, что общепринятый подход к формированию градиента свойств и структуры конструкционных низкоуглеродистых низколегированных сталей при изготовлении из них деталей машин, работающих при действии на поверхность циклических контактных напряжений, не может быть реализован для практической замены инструментальных сталей при изготовлении холодновысадочной оснастки. Обосновано применение конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей с приданием поверхности изделий высоких механических и эксплуатационных свойств посредством проведения цементации с последующей термической обработкой взамен инструментальных сталей. Сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе приводится описание материалов и используемых методов исследования. Для исследования выбраны стали У8А (ГОСТ 1435–99), 9ХС и Х12М (ГОСТ 5950–2000), 35ХГСА и 40Х (ГОСТ 4543–71), 42CrMoS4 (DIN EN 10083). Описаны методики и оборудование для определения химического и фазового состава, технологической пластичности.

Для изучения микроструктуры применялись сканирующий электронный *Tescan Vega II* и оптический *Метам РВ-22* микроскопы. Микротвердость сталей определялась на микротвердомере *ПМТ-3* по ГОСТ 9450–76, твердость по Виккерсу на приборе *DuraScan 20* по ГОСТ 2999–75, твердость по Роквеллу на приборе *TK-2М* по ГОСТ 9013–59. Количество углерода определялось методом фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895–97 при помощи спектрометра *SPECTROLAB LAVM11*, количество азота по ГОСТ 17745–90 при помощи анализатора *ON-900*. Фазовый состав поверхностных слоев исследовали на дифрактометрах *APD 2000* и *ДРОН-3*. Износо-

стойкость сплавов определялась на устройстве испытания материалов на контактную усталость и износ (пат. ВУ 7093). Оценка пластических свойств сплавов проводилась сжатием по ГОСТ 25.503–97 на испытательной машине *ИП-1250М-авто*. Моделирование напряженно-деформированного состояния на рабочих поверхностях отделочных пуансонов осуществлялась с помощью программного комплекса *ANSYS ED*.

Упрочнение инструментальных сталей осуществлялось посредством закалки с температуры 780 °С в воде (У8А) и с 860 °С в масле (9ХС). Упрочнение сталей 35ХГСА и 40Х осуществлялось путем проведения цементации и высокотемпературной нитроцементации при температуре 920 °С в течение 8 и 12 часов в твердофазном карбюризаторе. В случае проведения нитроцементации применялся карбюризатор с 25–30 % добавкой карбамида. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры 860 °С и отпуск при 200 °С. После закалки половина всех партий образцов подвергалась обработке холодом в среде жидкого азота.

Проведенный комплекс исследований для сталей 40Х и 35ХГСА показал, что нитроцементация, а также обработка холодом после закалки, не способствуют повышению износостойкости слоев. Поэтому для стали 42CrMoS4 проводилась только цементация по режимам сталей 40Х и 35ХГСА.

В третьей главе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния рабочих поверхностей пуансонов, интенсивности, особенностей изнашивания и технологической пластичности инструментальных сталей.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния поверхностей холодновысадочных пуансонов представлены на рисунке 1. Расчет эквивалентных напряжений осуществлялся по энергетической теории прочности (Мизеса). Определено, что на рабочих поверхностях пуансона для получения крестообразного шлица в головке винта и самореза величина максимальных эквивалентных и касательных напряжений составила 1760 и 390 МПа, пуансона для маркировки на головке болта – 1395 и 600 МПа. В зонах расположения максимальных эквивалентных напряжений локализуются максимальные эквивалентные деформации.

Использование сталей Х12М, У8А и 9ХС не позволяло сформировать рабочую часть инструмента без проведения промежуточных термоциклических отжигов. Кроме того, наличие карбидной ликвации в стали Х12М вынуждало вводить ограничения по величине деформации заготовки с целью предотвращения образования микротрещин на границах между включениями и металлической матрицей и проводить выдавливание рабочей части за три-четыре перехода. Для сталей У8А и 9ХС требовалось проведение двух переходов выдавливания. Для восстановления пластичности сталей перед каждым переходом проводился термоциклический отжиг в защитной атмосфере длительностью 56 часов. Следует отметить, что выдавливание гравюры инструмента из конструкционных сталей 40Х и 35ХГСА в отличие от стали Х12М реализуется за один переход вследствие присутствия феррита.

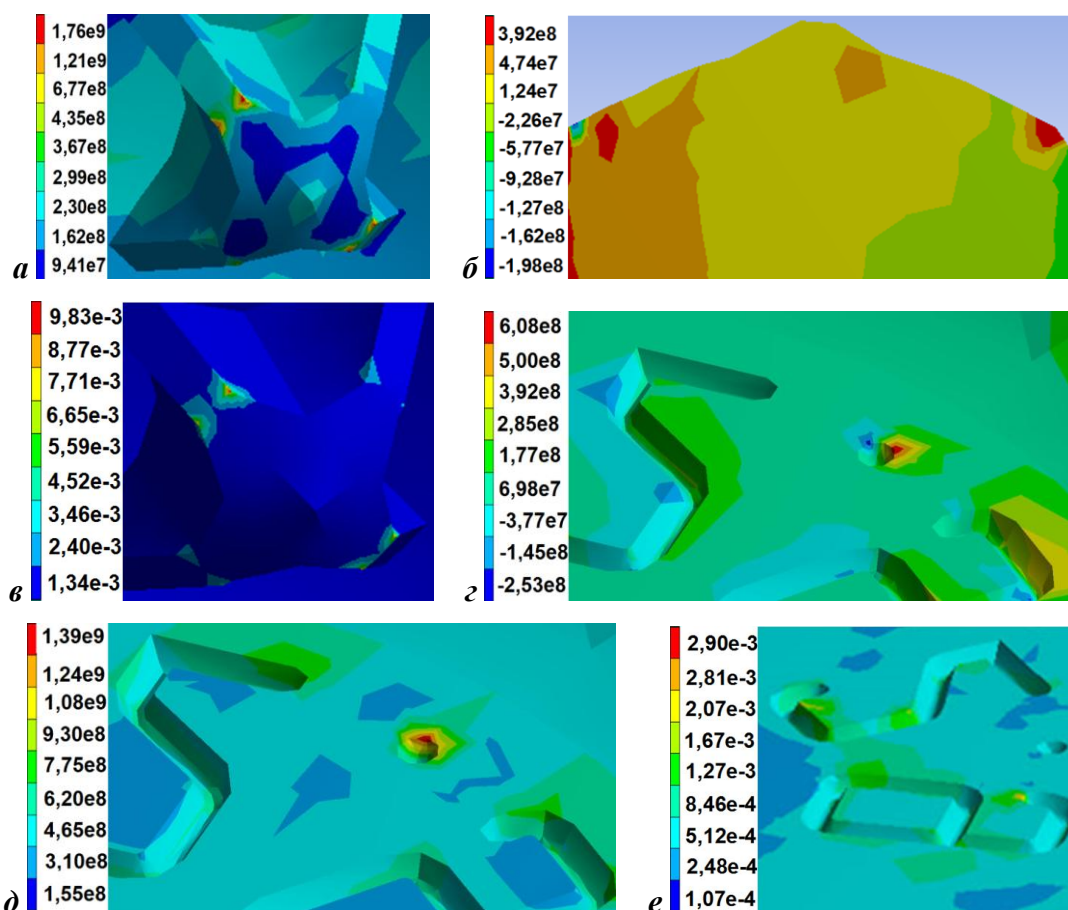
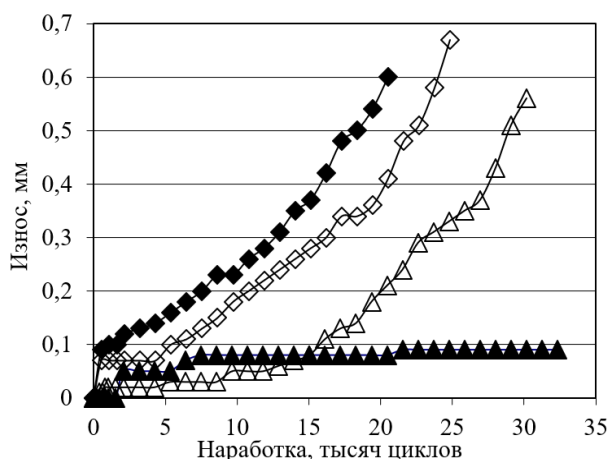


Рисунок 1 – Распределение эквивалентных (а, с) и касательных (б, д) напряжений, эквивалентных деформаций (е, е) по рабочим поверхностям холодновысадочных пуансонов

Установлено, что стойкость стали У8А в условиях малоциклового усталости при напряжениях 1300 ± 65 МПа, соответствующих эксплуатационным условиям работы пуансонов, соизмерима со стойкостью стали Х12М. Кривые износа стали У8А характеризуются двумя этапами изнашивания (рисунок 2). На первом, длительностью до 2 тыс. циклов нагружения, происходит приработка контактных поверхностей образцов. Второй этап характеризуется высокой износостойкостью из-за гомогенности сплава, способствующего отслоению с контактной поверхности мелких частиц деформированного сплава.

Проведены исследования по влиянию обработки холодом на структуру и стойкость сталей У8А и 9ХС. Экспериментально установлено и теоретически объяснено, что обработка холодом стали У8А после закалки приводит к снижению износостойкости. При этом период высокого сопротивления контактной усталости уменьшается до 12 тыс. циклов, после чего происходит резкое увеличение лунки износа (рисунок 2) с интенсивным удалением более крупных объемов материала с контактной поверхности образцов. Указанное явление связано со снижением доли остаточного аустенита после обработки холодом с 9 до 5 об. %. Выявлено, что при напряжениях 1300 ± 65 МПа сталь 9ХС уступает по износостойкости стали У8А (рисунок 2), что свидетельствует о пониженной вязкости легированной кремнием стали 9ХС. Изнашивание

стали происходит путем зарождения и роста усталостных трещин в контактной области. Отмечено, что обработка холодом стали 9ХС сохраняет период высокой износостойкости из-за незначительного снижения доли остаточного аустенита с 5 до 3 об. %.



▲ – сталь У8А; △ – сталь У8А с обработкой холодом;
◆ – сталь 9ХС; ◇ – сталь 9ХС с обработкой холодом

Рисунок 2 – Зависимости износа от числа циклов нагружения инструментальных сталей при напряжениях 1300 ± 65 МПа

Проведены исследования по определению технологической пластичности инструментальных сталей У8А, 9ХС и Х12М после термоциклического отжига путем испытания на сжатие. Выявлено, что площадка текучести появляется при сжимающих напряжениях величиной в пределах 205–258 МПа, а прирост деформации без значительного увеличения напряжения наблюдается в диапазоне 20–30 %. В результате осадки образцов происходит деформационное упрочнение, снижающее пластичность в процессе получения сложнопрофильного высадочного инструмента холодным выдавливанием, что требует применения дополнительного 56-часового отжига перед каждым переходом формообразования. В стали Х12М крупные первичные карбиды разрушаются с появлением микротрещин на стадии формирования рабочей поверхности пуансонов.

В четвертой главе представлены результаты определения технологической пластичности при сжатии конструкционных сталей, исследования влияния цементации и нитроцементации на структуру, свойства и интенсивность изнашивания термодиффузионных слоев, определения их фазового и химического состава. Выявлены различия в структуре слоев, их взаимосвязь с режимами обработки и зависимостями износа.

На рисунке 3 приведены результаты испытания на сжатие конструкционных сталей 40Х и 35ХГСА в состоянии поставки (нормализация) и после изотермического отжига. Определено, что применение сталей без проведения дополнительного изотермического отжига дает возможность получать сложнопрофильную рабочую поверхность за один переход выдавливания, что реализуется при изготовлении отделочных пуансонов.

Исследовано влияние режимов ХТО с последующей термической обработкой на структурообразование науглероженных и нитроцементованных слоев конструкционных низколегированных сталей 40X и 35ХГСА. Установлено, что после закалки и низкого отпуска цементованные и нитроцементованные слои сталей 40X и 35ХГСА содержат мартенсит отпуска, остаточный аустенит, а также карбиды цементитного типа, различающиеся размерами (рисунок 4). В нитроцементованных слоях присутствуют мелкодисперсные карбиды, выявленные в результате рентгенофазового анализа. Формирование карбонитридов или нитридов не обнаружено вследствие малого количества азота (0,010–0,039 мас. %) на поверхности нитроцементованных слоев.

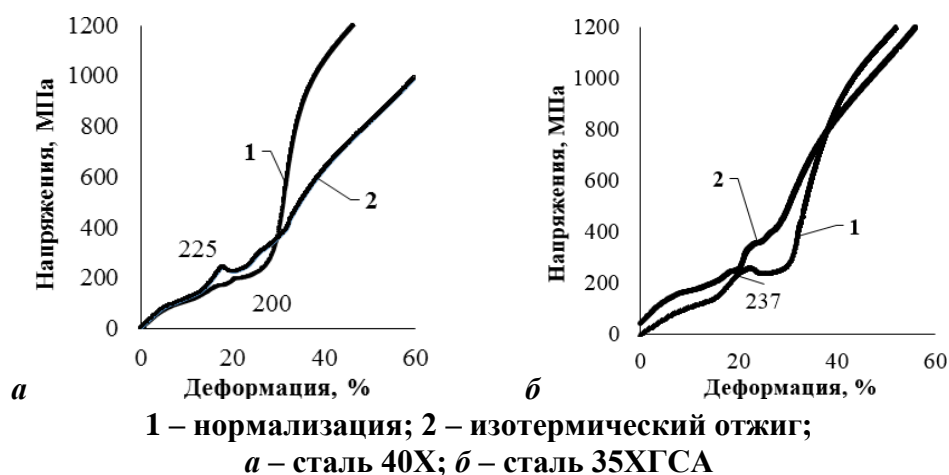


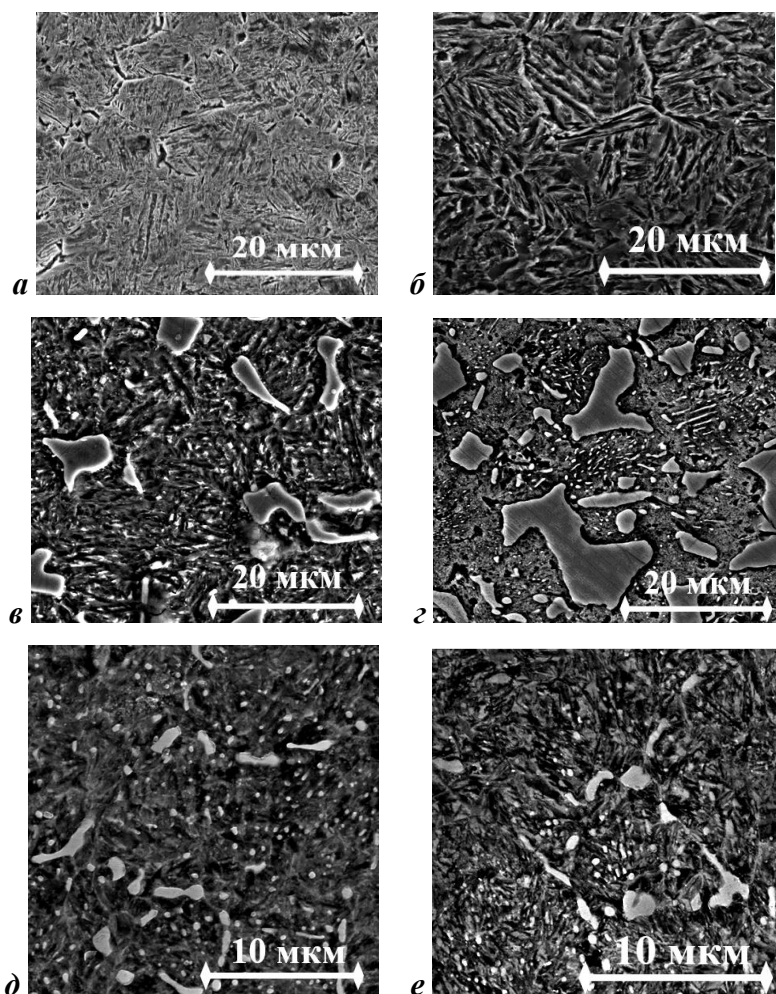
Рисунок 3 – Диаграммы сжатия конструкционных сталей

Выявлено, что увеличение длительности цементации с 8 до 12 часов способствует увеличению объемной доли и размеров включений в термоупрочненных цементованных слоях стали 40X. Доля карбидов повысилась с 15 до 40 об. %, а максимальный размер увеличился с 10 до 20 мкм. Повышенное содержание марганца и кремния в стали 35ХГСА способствует гомогенизации сплава, в котором с увеличением времени насыщения доля карбидов составила 10 и 15 об. % соответственно, а их размер не превысил 3 мкм.

Определено, что толщина всех термодиффузионных слоев после 8-часового насыщения составила 1,6–1,8 мм для стали 35ХГСА и 1,8–2,0 мм для стали 40X. После 12-часовой ХТО их толщина достигла 2,0–2,2 мм для обеих сталей. Микротвердость поверхности слоев стали 40X составила 7900–8700 МПа, а стали 35ХГСА – 9000–9700 МПа. Микротвердость сердцевины стали 40X составила 5500–6000 МПа, стали 35ХГСА – 6000–6200 МПа. Повышенные значения микротвердости стали 35ХГСА обусловлены легированием кремнием. Отмечено, что проведение обработки холодом после закалки повышает микротвердость поверхности слоев сталей 40X и 35ХГСА на 1–11 % за счет уменьшения объемной доли γ -фазы.

Изучено влияние вида и длительности ХТО на количество углерода в термодиффузионных слоях сталей 40X и 35ХГСА. Выявлено, что увеличение длительности цементации с 8 до 12 часов приводит к повышению содержания

углерода в поверхностных слоях стали 40X с 1,67 до >1,8 мас. %. В случае проведения нитроцементации содержание углерода у образцов стали 40X составило 1,27 мас. % для обоих случаев продолжительности насыщения. Сталь 35ХГСА характеризуется пониженным коэффициентом диффузии углерода по сравнению со сталью 40X, что связано с дополнительным легированием стали 35ХГСА кремнием и марганцем. Увеличение длительности цементации с 8 до 12 часов повысило количество углерода на поверхности стали 35ХГСА с 1,1 до 1,3 мас. %. Для нитроцементованных слоев стали 35ХГСА количество углерода оказалось равным 0,8 мас. % независимо от длительности насыщения.



a – нитроцементованные слои (глубина 0,05 мм.);

б – сердцевина (глубина 2,5 мм.);

в – слой до 0,2 мм. стали 40X после 8-часовой цементации;

г – слой до 0,2 мм. стали 40X после 12-часовой цементации;

д – слой до 0,2 мм. стали 35ХГСА после 8-часовой цементации;

е – слой до 0,2 мм. стали 35ХГСА после 12-часовой цементации

Рисунок 4 – Структура поверхностного слоя сталей 40X и 35ХГСА после ХТО и ТО

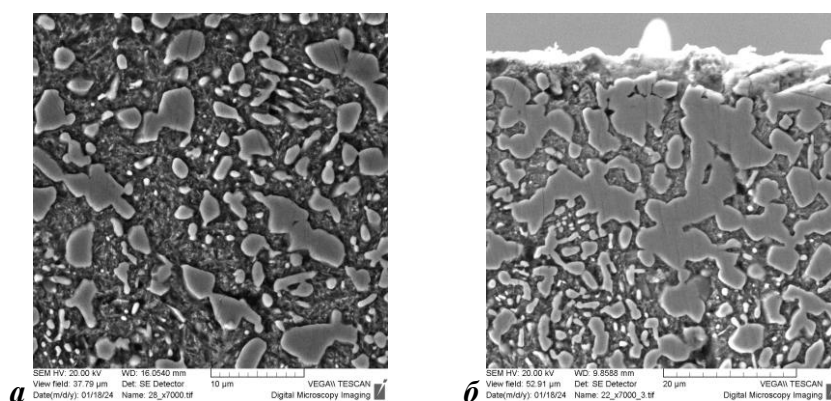
Определено количество остаточного аустенита на поверхности термо-диффузионных слоев сталей 40X и 35ХГСА (таблица). Обнаружено, что объемная доля γ -фазы в слоях стали 40X имеет повышенное значение по отношению к аналогичным слоям стали 35ХГСА. В нитроцементованных слоях количество

остаточного аустенита больше, чем в цементованных, сформированных при одинаковой длительности насыщения. Большее количество аустенита в слоях стали 40X связано с повышенным содержанием углерода в них.

Таблица – Количество γ -фазы на поверхности термодиффузионных слоев сталей 35ХГСА и 40Х, об. %

| Технология упрочнения | Длительность ХТО, часов | Сталь 35ХГСА | | Сталь 40Х | |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | Без обработки холодом | С обработкой холодом | Без обработки холодом | С обработкой холодом |
| Нитроцементация, закалка, Н.О. | 8 | 10±2,5 | 8±2,5 | 23±2,5 | 10±2,5 |
| | 12 | 13±2,5 | 11±2,5 | 25±2,5 | 13±2,5 |
| Цементация, закалка, Н.О. | 8 | 7±2,5 | 6±2,5 | 17±2,5 | 10±2,5 |
| | 12 | 10±2,5 | 8±2,5 | 18±2,5 | 8±2,5 |

Исследовано влияние длительности цементации с последующей термической обработкой на структурообразование стали 42CrMoS4. Определено, что при увеличении длительности ХТО с 8 до 12 часов доля карбидной фазы в поверхностном слое возросла с 30 до 40 об. % при увеличении размеров карбидов с 10 до 30 мкм (рисунок 5). Большее содержание карбидной фазы в слоях стали 42CrMoS4 по сравнению со сталью 40Х связано с легированием молибденом (0,21 мас. %), который значительно уменьшает количество углерода в эвтектоиде. Определено, что на поверхности цементованных слоев количество γ -фазы возросло с 12 до 13 об. %, а массовая доля углерода в обоих случаях превысила 1,8 мас. %. При этом микротвердость поверхности снизилась с 8500 до 8300 МПа. Толщина диффузионных слоев возросла с 1,9 до 2,0 мм. при одинаковом значении микротвердости сердцевины на уровне 6100 МПа в обоих случаях.



а – 8 часов; б – 12 часов

Рисунок 5 – Структура поверхности цементованных слоев стали 42CrMoS4

Установлено, что на кривых изнашивания термодиффузионных слоев сталей 40Х и 35ХГСА присутствуют три участка, отражающие этапы приработки (I), минимального (II) и ускоренного износа (III) (рисунок 6). Приработка контактных поверхностей происходит в течение 1 тыс. циклов нагружения.

Период минимального износа составил 5–6,5 тыс. циклов нагружения для слоев стали 35ХГСА после 8-часового насыщения и возрос до 6,5–9 тыс. после 12-часового. Слои стали 40Х, сформированные в течение 8 часов, проявляют повышенную износостойкость на протяжении 12–14 тыс. циклов нагружения. При этом увеличение длительности ХТО до 12 часов снижает этап минимального износа до 2 тыс. циклов. Указанное явление связано с высоким содержанием карбидной фазы (40 об. %) в науглероженных слоях, а также повышенным содержанием γ -фазы в цементованных 8–18 об. % и нитроцементованных 13–25 об. % слоях.

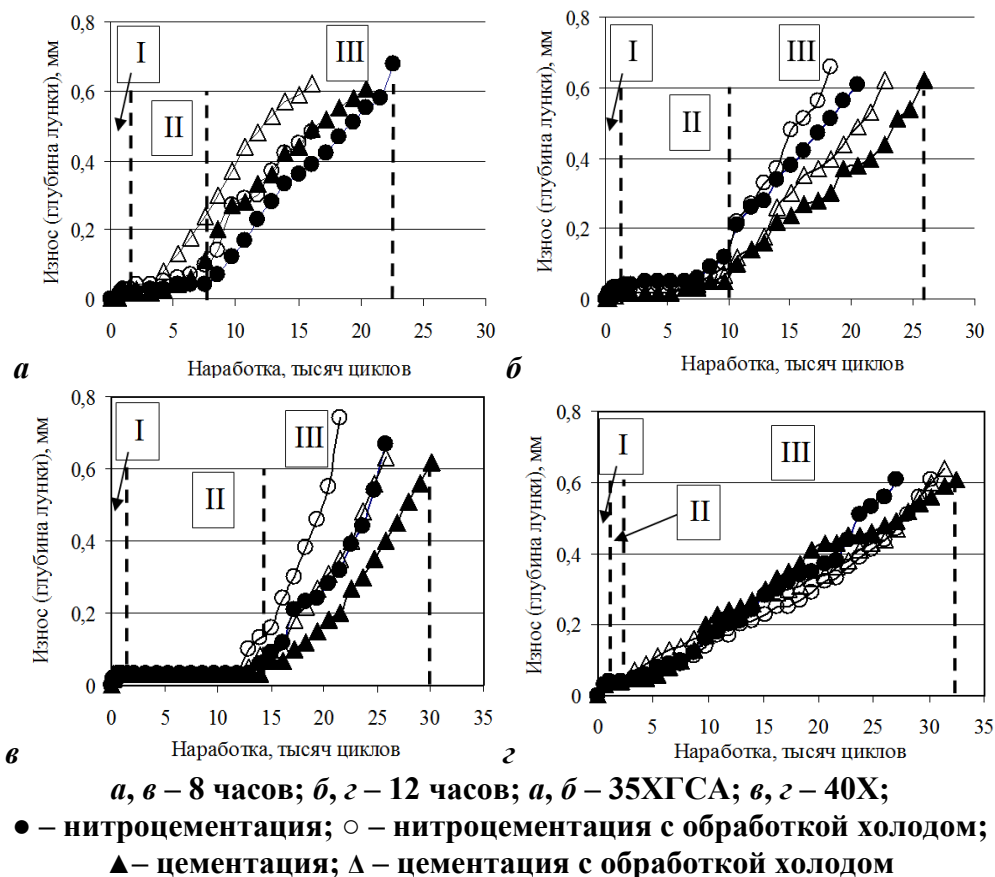


Рисунок 6 – Зависимости износа от числа циклов нагружения конструкционных сталей при напряжениях 1300 ± 65 МПа

Установлено, что зависимости износа цементованных слоев стали 42CrMoS4 (рисунок 7) значительно отличаются от аналогичных слоев сталей 35ХГСА и 40Х (рисунок 6). Начальный этап характеризуется катастрофическим износом, что связано с высоким содержанием крупных коагулированных карбидов. При достижении глубины лунки износа порядка 0,2 мм скорость изнашивания снижается вследствие содержания в сплаве меньшего количества хрупких карбидов и увеличения удельной доли металлической матрицы, обладающей повышенной вязкостью.

Установлено, что максимальной износостойкостью при контактных напряжениях 1300 ± 65 МПа обладают термоупрочненные науглероженные слои стали 35ХГСА после 12-часового и стали 40Х после 8-часового насыще-

ния, структура которых состоит из мартенсита, не более 15 об. % избыточных карбидов размером до 10 мкм, содержанием углерода на поверхности не более 1,67 мас. %, а также остаточного аустенита – 10 об. % в стали 35ХГСА и 17 об. % в стали 40Х. Этап высокой износостойкости для стали 35ХГСА и 40Х сохраняется до 10 и 14 тыс. циклов нагружения соответственно.

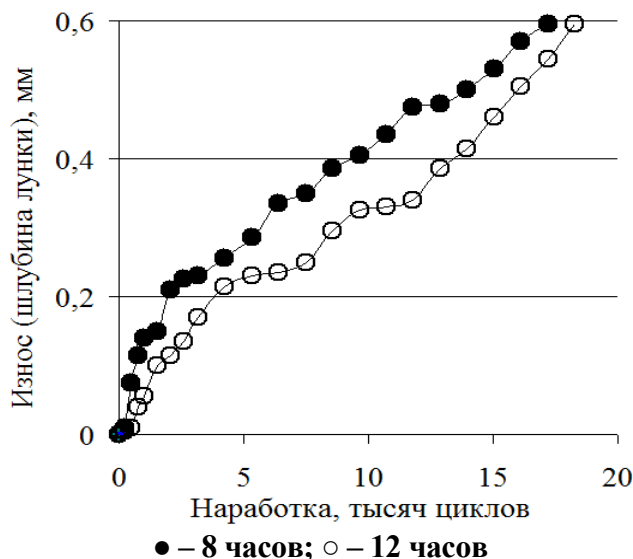


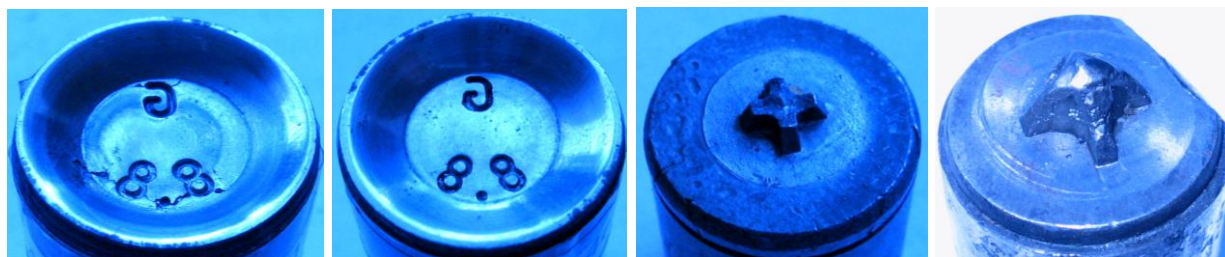
Рисунок 7 – Зависимости износа от числа циклов нагружения цементованных слоев стали 42CrMoS4 при напряжениях 1300±65 МПа

В пятой главе представлены результаты практической реализации технологических рекомендаций по изготовлению холодновысадочного инструмента со сложнопрофильной рабочей поверхностью из конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей.

Проведенные исследования влияния структурно-фазовых составляющих на зависимости изнашивания термодиффузионных слоев сталей 35ХГСА и 40Х показали, что после цементации стали 35ХГСА в течение 12 часов или стали 40Х в течение 8 часов формируется слой, способный сохранять период высокой износостойкости в течение 10–14 тыс. циклов нагружения циклическими контактными напряжениями 1300±65 МПа.

Промышленные испытания отделочных пуансонов показали, что стойкость пуансонов из сталей 35ХГСА и 40Х с термоупрочненными науглероженными слоями повысилась в 2,7–3,2 раза по сравнению с пуансонами из инструментальной высоколегированной стали Х12М.

Технологические рекомендации упрочнения внедрены на ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» в технологию производства отделочных пуансонов из конструкционных сталей 35ХГСА и 40Х с термодиффузионным упрочнением поверхности (рисунок 8). Изменения маршрута внесены в технологические карты 171.1461.4010/061, 171.1461.4200/061, 171.1461.0003/053, 617.1469.7008/052 и 171.1460.4016/064.



a, (5000) *б*, (15000) *в*, (30000) *г*, (140000)
a, в – сталь Х12М; *б, г* – стали 35ХГСА и 40Х с термодиффузионными слоями
Рисунок 8 – Состояние рабочих поверхностей отделочных пуансонов после испытаний (количество полученных поковок)

В настоящее время на ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» используются разработанные технологические рекомендации по упрочнению холодновысадочного инструмента из конструкционных сталей 40Х и 35ХГСА. При изготовлении отделочных пуансонов холодной высадки на ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» в количестве 1000 шт. ожидаемый экономический эффект за 2025 г. составит 32964,80 бел. рубля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана технология упрочнения отделочных пуансонов холодной высадки из конструкционных низколегированных сталей 40Х и 35ХГСА с термодиффузионным упрочнением, имеющих в 2,7–3,2 раза более высокую стойкость по сравнению с пуансонами из инструментальной высоколегированной стали Х12М. Использование разработанных термодиффузионно-упрочненных пуансонов из конструкционных сталей позволило повысить рентабельность процесса высадки головок болтов, винтов и саморезов [6–А; 7–А; 16–А; 17–А; 23–А; 25–А].

2. Исследовано напряженно-деформированное состояние рабочих поверхностей отделочных пуансонов, позволившее определить зоны концентрации напряжений и деформаций. Показано, что на поверхности пуансона для получения крестообразного шлица в головке винта и самореза максимальные эквивалентные напряжения (1760 МПа), а также эквивалентные деформации локализованы на острых кромках выступающих частей пуансона, формирующих внутреннюю полость в заготовке. Величина максимальных касательных напряжений составила 390 МПа, и расположены они в той же области, но в подповерхностном слое. Для маркировочного пуансона максимальные эквивалентные напряжения (1395 МПа), и касательные (600 МПа), а также максимальные эквивалентные деформации сосредоточены на поверхности гравюры инструмента в области элементов, формирующих точку, буквы и цифры. Производственные испытания пуансонов показали, что в данной области при эксплуатации образуются трещины контактной усталости, а выступающая часть гравюры скалывается [4–А].

3. Исследовано влияние остаточного аустенита на структурообразование и особенности изнашивания в условиях малоциклового усталости термообработанных инструментальных сталей 9ХС и У8А при циклических контактных напряжениях 1300 ± 65 МПа, соответствующих эксплуатационным условиям работы мелкогабаритных отделочных пуансонов. Установлено, что износостойкость стали 9ХС существенно ниже, чем стали У8А. Обнаруженное явление обусловлено низким содержанием остаточного аустенита (5 об. %) и легированием стали 9ХС кремнием, что в совокупности снижает ее вязкость. Обработка холодом стали У8А после закалки значительно снижает период высокой износостойкости до 12 тыс. циклов нагружения из-за снижения доли остаточного аустенита с 9 до 5 об. %. Для стали 9ХС влияние обработки холодом на характеристики изнашивания незначительно вследствие небольшого снижения количества остаточного аустенита с 5 до 3 об. % [1–А; 2–А; 9–А].

4. Исследованы структурные особенности и технологическая пластичность инструментальных сталей У8А, 9ХС, Х12М после термоциклического отжига и конструкционных сталей 35ХГСА и 40Х в состоянии поставки и после изотермического отжига. Установлено, что наличие избыточного феррита в сталях 35ХГСА и 40Х позволяет равномерно перераспределять внешнюю нагрузку по всему объему сплавов. Это дает возможность сформировать качественную рабочую поверхность отделочных пуансонов из сталей 40Х и 35ХГСА за один переход выдавливания вместо двух-четырех переходов с дополнительными термоциклическими отжигами, длительностью 56 часов каждый, при выдавливании гравюры пуансонов из сталей У8А, 9ХС и Х12М [7–А].

5. Исследовано влияние вида и длительности химико-термической обработки, а также обработкой холодом после закалки на структурообразование науглероженных и нитроцементованных слоев сталей 40Х, 35ХГСА и длительности цементации на структурообразование стали 42CrMoS4. Установлено, что увеличение длительности цементации с 8 до 12 часов приводит к повышению доли карбидной фазы в термообработанных слоях стали 35ХГСА с 10 до 15 об. %, стали 40Х с 15 до 40 об. %, стали 42CrMoS4 с 30 до 40 об. %. Выявлено, что доля остаточного аустенита в слоях стали 40Х больше, чем в аналогичных слоях стали 35ХГСА, а также больше в нитроцементованных, чем в цементованных. Обработка холодом после закалки во всех случаях снижает содержание γ -фазы на поверхности слоев на 14–20 % для стали 35ХГСА и на 41–56 % для стали 40Х, что отражается на повышении микротвердости поверхности упрочненных слоев сталей 40Х и 35ХГСА. Толщина слоев всех сталей после 8-часового насыщения составила 1,6–2,0 мм, а после 12-часового – 2,0–2,2 мм [3–А; 6–А; 8–А; 10–А; 11–14–А; 17–21–А].

6. Исследовано влияние вида и длительности химико-термической обработки, а также обработки холодом после закалки сталей 40Х и 35ХГСА и длительности цементации стали 42CrMoS4 на их износостойкость в условиях малоциклового усталости при напряжениях 1300 ± 65 МПа. Показано, что изнашивание всех исследованных термодиффузионных слоев носит усталостный характер и заключается в выкрашивании и отслаивании объемов дефор-

мированного сплава. Установлено, что наибольшим сопротивлением к изнашиванию обладают термоупрочненные слои стали 40X после 8-часовой и стали 35ХГСА после 12-часовой цементации с последующей закалкой и низким отпуском, структура которых состоит из мартенсита, не более 15 об. % избыточных карбидов размером до 10 мкм, остаточного аустенита – 10 об. % в стали 35ХГСА и 17 об. % в стали 40X, а также содержащих не более 1,67 мас. % углерода на поверхности. Выявлено, что содержание углерода более 1,8 мас. % на поверхности цементованных слоев способствует формированию в слоях высокого содержания (>30 об. %) крупных (>10 мкм) карбидов, снижающих способность сплава качественно противостоять интенсивному усталостному разрушению [6–А; 8–А; 14–А; 17–А; 19–21–А; 23–А; 25–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная технология термодиффузионного упрочнения конструкционных сталей 35ХГСА и 40X, заключающаяся в проведении цементации при температуре 920 °С в течение 8 ч стали 40X и 12 ч стали 35ХГСА, последующей закалке в масле с температуры 860 °С и отпуске при 200 °С, использована при изготовлении отделочных пуансонов холодной высадки. Данная технология упрочнения перспективна при изготовлении опорных и распределительных дисков аксиально-поршневых насосов, изготовление которых проводится из высоколегированной инструментальной стали Х12М [5–А; 15–17–А; 22–А; 23–А; 25–А].

Проведена опытно-промышленная апробация отделочных пуансонов из конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей 40X и 35ХГСА с термодиффузионным упрочнением поверхности на ОАО «Гомельский завод литья и нормалей», которая показала повышение их стойкости в 2,7–3,2 раза по сравнению с аналогичными пуансонами, первоначально изготавливаемыми из инструментальной стали Х12М. При изготовлении отделочных пуансонов холодной высадки на ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» в количестве 1000 шт. ожидаемый экономический эффект за 2025 г. составит 32964,80 бел. рубля.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты используются в образовательном процессе учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» при подготовке студентов и магистрантов.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках

1–А. Степанкин, И. Н. К вопросу влияния диффузионного упрочнения на механизм контактного изнашивания экономнолегированных сталей / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. трудов : в 3 кн. / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол. : С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 395–409.

2–А. Степанкин, И. Н. Контактное изнашивание инструментальных сталей X12M, 9XC и У8А / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 19–24.

3–А. Поздняков, Е. П. Структурообразование карбонитридных и карбидных слоев легированных сталей / Е. П. Поздняков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. трудов : в 3 кн. / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол. : С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 102–107.

4–А. Степанкин, И. Н. К вопросу изготовления мелкогабаритного штампового инструмента из экономнолегированных сталей с диффузионным упрочнением поверхностного слоя / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 9. – С. 25–32.

5–А. Степанкин, И. Н. Влияние структуры поверхностных слоев на характер взаимодействия пар трения, образованных сталями X12M, 40X и 35ХГСА с бронзой БрАЖ9–4 / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, В. Г. Кудрицкий // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 2. – С. 228–233.

6–А. Степанкин, И. Н. К вопросу контактного изнашивания карбонитридных и карбидных слоев легированных конструкционных сталей 35ХГСА и 40X / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, Д. Н. Романенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. трудов : в 3 кн. / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол. : С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 239–247.

7–А. Степанкин, И. Н. Технологическая пластичность при холодном выдавливании гравюры штампового инструмента: практическая реализация / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. трудов : в 3 кн. / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол. : А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 207–213.

8–А. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев сталей 40X и 35ХГСА / И. Н. Степанкин, А. В. Астрейко, Е. П. Поздняков, А. В. Радионов // Современные методы и технологии со-

здания и обработки материалов : сб. науч. трудов / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 104–116.

9–А. Степанкин, И. Н. Влияние остаточного аустенита на износостойкость инструментальных сталей У8А и 9ХС / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, № 4. – С. 377–386.

10–А. Поздняков, Е. П. Влияние длительности цементации на структуру и свойства конструкционных среднеуглеродистых сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4 / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Литье и металлургия. – 2024. – № 1. – С. 69–77.

Статьи в сборниках научных трудов

11–А. Поздняков, Е. П. Износостойкость науглероженных слоев среднеуглеродистых конструкционных сталей / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин, Д. В. Куис, С. Н. Лежнев // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 103–107.

Материалы конференций

12–А. Поздняков, Е. П. Особенности структурообразования поверхностно упрочненных слоев экономнолегированной стали 40Х / Е. П. Поздняков // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2014 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2014. – С. 141–144.

13–А. Степанкин, И. Н. К вопросу оценки стойкости к контактному изнашиванию машиностроительных сталей / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ–2014) : сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф., Курск, 28 нояб. 2014 г. / Юго-Зап. гос. ун-т. ; редкол. : Е. В. Агеев (отв. ред.) [и др.]. – Курск, 2014. – С. 142–149.

14–А. Поздняков, Е. П. Особенности контактного изнашивания диффузионно-упрочненных слоев экономно-легированных сталей / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // МИКМУС–2014 : материалы XXVI Междунар. инновационно-ориентированной конф. молодых ученых и студентов, Москва, 17–19 дек. 2014 г. / Ин-т машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН. – Москва, 2014 – С. 255–259.

15–А. Поздняков, Е. П. К вопросу экономической привлекательности ресурсного проектирования деталей машин и инструментальной оснастки / Е. П. Поздняков // Беларусь в современном мире : материалы VIII Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 5–6 мая 2015 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2015. – С. 297–299.

16–А. Поздняков, Е. П. Экономическое обоснование метода упрочнения деталей машин и технологической оснастки / Е. П. Поздняков // Беларусь в современном мире : материалы IX Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 19–20 мая и 7 июня 2016 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2016. – С. 240–243.

17–А. Степанкин, И. Н. Влияние остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев конструкционных улучшаемых сталей 40X и 35ХГСА / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, А. В. Астрейко // Новые горизонты – 2018 : сб. материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, 15–16 нояб. 2018 г., Минск : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 44–46.

18–А. Износостойкость науглероженных слоев конструкционной стали 42CrMoS4 / Е. П. Поздняков, А. В. Рабков, Н. С. Коноваленко, А. В. Радионов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, 22–23 апр. 2021 г., Гомель : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 141–144.

19–А. Поздняков, Е. П. Микроструктура и свойства науглероженных слоев среднеуглеродистых конструкционных сталей 35ХГСА, 40X и 42CrMoS4 / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 7-ой Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 17 нояб. 2023 г. : в 2 ч. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2023. – Ч.1. – С. 216–221.

20–А. Поздняков, Е. П. Износостойкость цементованных слоев конструкционных сталей 35ХГСА, 40X И 42CrMoS4 / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель, 2024. – С. 73–75.

21–А. Поздняков, Е. П. Износостойкость цементованных слоев среднеуглеродистых конструкционных сталей / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Старый Оскол, 21 дек. 2023 г. / Старооскольский технологический ин-т им. А. А. Угарова ; редкол. : А. В. Боева [и др.]. – Старый Оскол, 2024. – С. 73–79.

Тезисы докладов

22–А. Поздняков, Е. П. Опыт применения экономно-легированной конструкционной стали 35ХГСА для замены высоколегированных сталей при изготовлении деталей машин трения / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы между-

нар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 144.

23–А. Степанкин, И. Н. Опыт применения экономнолегированных конструкционных сталей для производства мелкогабаритного штампового инструмента / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. 31-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 апр. 2015 г. / НАН Беларуси ; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2015, – С. 170–172.

24–А. Степанкин, И. Н. К вопросу влияния структуры поверхностных слоев на характер взаимодействия пар трения БрАЖ9–4 – сталь Х12М и БрАЖ9–4 – сталь 35ХГСА, сталь 40Х с науглероженными слоями / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, В. Г. Кудрицкий // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ–2015) : Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–26 июня 2015 г. / Ин-т механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси ; редкол. : В. Н. Адериша [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 92.

25–А. Степанкин, И. Н. Применение конструкционных сталей с диффузионным упрочнением поверхности для производства мелкогабаритного штампового инструмента / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, О. Г. Девойно // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. 32-ой Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 7–8 апр. 2016 г. / НАН Беларуси ; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2016. – С. 142–144.

Патент

26–А. Полезная модель ВУ 10548, МПК G 01N 3/56 (2006.01). Устройство испытания образцов на износостойкость : № и 20140274 : заявлено 24.07.2014 : опубл. 28.02.2015 / Степанкин И. Н., Поздняков Е. П., Панкратов И. А., Новик Ю. Д., Белый Д. И.; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – 3 с.

РЭЗІЮМЭ

Пазднякоў Яўген Пятровіч

Павышэнне ўстойлівасці аздобных пуансонаў халоднай высадкі з канструкцыйных нізкалегіраваных сталей з тэрмадыфузійным умацаваннем

Ключавыя словы: сярэднеугляродзістыя нізкалегіраваныя сталі, халоднае выцісканне, цэментацыя, нітрацэментацыя, кантактная трываласць, знос

Мэта работы: распрацоўка тэхналогіі ўмацавання аздобных пуансонаў для халоднай высадкі галовак метызаў з наяўнасцю элементаў гравюры таўшчыней не больш за 2 мм у сячэнні з канструкцыйных сярэднеугляродзістых нізкалегіраваных сталей з тэрмадыфузійным умацаваннем з павышанай устойлівасцю ў параўнанні з пуансонамі з высокалегіраванай інструментальнай сталі.

Метады даследавання і апаратура: аналіз мікраструктуры, вызначэнне фазавага і хімічнага складу, механічныя і эксплуатацыйныя ўласцівасці сталей, камп'ютарнае мадэляванне напружана-дэфарміраванага стану інструмента, аптычныя і сканіруючыя мікраскопы, спектрометры, газааналізатары, дыфрактометры, устаноўка для выпрабавання на стомленасць і знос, стандартныя і агульнапрынятыя ў тэхнічных навуках метады даследаванняў і лабараторнае абсталяванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны тэхналагічныя рэжымы хіміка-тэрмічнай і тэрмічнай апрацовак, якія дазволілі зрабіць замену інструментальных сталей на канструкцыйныя сярэднеугляродзістыя нізкалегіраваныя 35ХГСА і 40Х з дыфузійным умацаваннем паверхні. Крытэрыем для замены матэрыялаў з'яўляюцца вынікі эксперыментальных выпрабаванняў, праведзеныя ва ўмовах цыклічнага нагружэння аб'ектаў даследаванняў пры напружаннях каля 1300 ± 65 МПа.

У выніку прамысловага ўкаранення тэхналогіі тэрмадыфузійнага ўмацавання паверхні канструкцыйных сярэднеугляродзістых нізкалегіраваных сталей 35ХГСА і 40Х павялічалася трываласць аздобных пуансонаў у 2,7–3,2 разы ў параўнанні з пуансонамі, якія зроблены са сталі Х12М.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследаванняў выкарыстаны пры вырабе аздобных пуансонаў з сярэднеугляродзістых нізкалегіраваных канструкцыйных сталей 35ХГСА і 40Х.

Галіна прымянення: металургія, машынабудаванне.

РЕЗЮМЕ

Поздняков Евгений Петрович

Повышение стойкости отделочных пуансонов холодной высадки из конструкционных низколегированных сталей с термодиффузионным упрочнением

Ключевые слова: среднеуглеродистые низколегированные стали, холодное выдавливание, цементация, нитроцементация, контактная выносливость, износ

Цель работы: разработка технологии упрочнения отделочных пуансонов для холодной высадки головок метизов с наличием элементов гравюры толщиной не более 2 мм в сечении из конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей с термодиффузионным упрочнением с повышенной стойкостью по сравнению с пуансонами из высоколегированной инструментальной стали.

Методы исследования и аппаратура: анализ микроструктуры, определение фазового и химического состава, механических и эксплуатационных свойств сталей, компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния инструмента, оптические и сканирующие микроскопы, спектрометры, газоанализаторы, дифрактометры, установка для испытания на усталость и износ, стандартные и общепринятые в технических науках методы исследований и лабораторное оборудование.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны технологические режимы химико-термической и термической обработок, позволившие произвести замену инструментальных сталей на конструкционные среднеуглеродистые низколегированные 35ХГСА и 40Х с диффузионным упрочнением поверхности. Критерием для замены материалов являются результаты экспериментальных испытаний, проведенных в условиях циклического нагружения объектов исследований при напряжениях около 1300 ± 65 МПа.

В результате промышленного внедрения технологии термодиффузионного упрочнения поверхности конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей 35ХГСА и 40Х увеличилась стойкость отделочных пуансонов в 2,7–3,2 раза по сравнению с пуансонами, изготовленными из стали Х12М.

Рекомендации по использованию. Результаты исследований использованы при изготовлении отделочных пуансонов из среднеуглеродистых низколегированных конструкционных сталей 35ХГСА и 40Х.

Область применения: металлургия, машиностроение.

SUMMARY

Pozdnyakov P. Evgenij

Increasing the durability of cold heading finishing punches made of low-alloy structural steels with thermal diffusion hardening a thermodiffusion-hardened layer

Key words: medium-carbon low alloy steels, cold extrusion, carburizing, carbonitriding, contact strength, wear

Research objective: development of a technology for strengthening finishing punches for cold heading of fastener heads with engraving elements no more than 2 mm thick in cross-section from structural medium-carbon low-alloy steels with thermal diffusion hardening with increased durability compared to punches made of high-alloy tool steel.

Methods of work and equipment: analysis of the microstructure, defining phase and chemistry composition, mechanical and operating properties of steels, computer simulation of stress-strain state of the tool, optical and electronic microscopes, spectrographs, gas analyzers, diffractometers, equipment for testing fatigue and wear, standard and generally accepted in technical science methods of investigations and laboratory equipment.

The results obtained and their novelty: operating practices of chemical-thermal treatment are developed enabling to replace tool steels with constructional medium-carbon low alloy steels 35CrMnSi4 and 41Cr4 both with diffused hardening of the surface. The criterion for material replacement is the results of experimental tests conducted in the conditions of pulsating loading of the objects under study with the amplitude of contact stress about 1300 ± 65 MPa.

The application of the method of thermal diffusion hardening of the surfaces of constructional medium-carbon low alloy steels of grades 35CrMnSi4 and 41Cr4 in industry resulted in the increase of wear resistance of finishing dies 2,7–3,2 times in comparison with the dies made of X155CrMo12-1 steel.

Recommendations for use. The research data are used in manufacturing finishing dies produced of medium-carbon low alloy constructional steels of 35CrMnSi4 and 41Cr4 grades.

Application area: metallurgy, mechanical engineering.

Научное издание

ПОЗДНЯКОВ
Евгений Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ
ОТДЕЛОЧНЫХ ПУАНСОНОВ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКИ
ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ
С ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Подписано в печать 02.03.2026 г.
Формат бумаги 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,66.
Тираж 70 экз. Заказ № 154.

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель