

УДК 621.78

**РЕСУРСНАЯ ОЦЕНКА КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ
СПЛАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ НАГРУЗОК**

**RESOURCE ASSESSMENT OF CONTACT ENDURANCE OF ALLOYS
UNDER PULSATING LOADS ACTION**

*Степанкин И.Н.¹, Поздняков Е.П.¹, Степанкина Л.В.²,
Куис Д.В.³, Лежнев С.Н.⁴*

¹ Гомельский государственный технический университет имени П.О.
Сухого, Гомель, Беларусь

²ОАО «Научно–технический центр комбайностроения», Гомель, Беларусь
Белорусский государственный технологический университет, Минск,
Беларусь

⁴НАО «Рудненский индустриальный университет», Рудный, Казахстан
igor-stepankin@mail.ru

*Stepankin I.N.¹, Pozdnyakov E.P.¹, Stepankina L.V.², Kuis D.V.³, Lezhnev
S.N.⁴*

¹Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Belarus

²Scientific and Technical Center of Combine Engineering, Gomel, Belarus

³Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

⁴Rudny Industrial University, Rudny, Kazakhstan

Аннотация: В работе рассмотрены аспекты оригинального подхода определения стойкости материала к контактной усталости. Использована методика испытаний, отражающая интенсивность накопления структурных повреждений в поверхностном слое металла. Показано, что на основании нового подхода появляется возможность гарантированного прогнозирования периода минимального изнашивания.

Ключевые слова: контактное изнашивание, ресурсная оценка, легированная сталь, поверхностное упрочнение диффузионным способом.

Abstract: The paper considers aspects of an original approach to determining the resistance of a material to contact fatigue. A test procedure reflecting the intensity of accumulation of structural damage in the surface layer of the metal was used. It is shown that based on the new approach, it is possible to guarantee the prediction of the minimum wear period.

Keywords: contact wear, resource assessment, alloy steel, surface hardening by diffusion method.

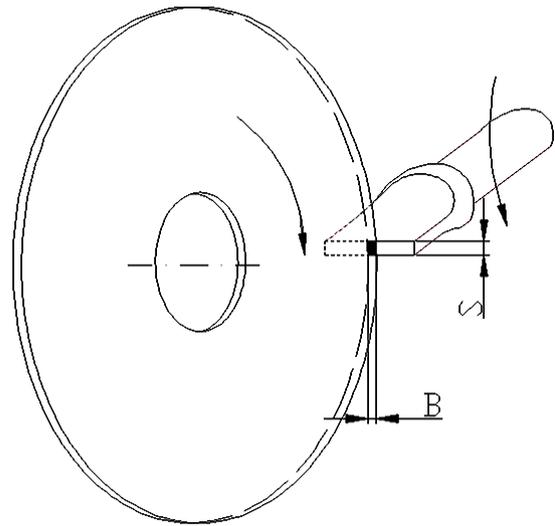
Испытания на контактную выносливость на основе существующих нормативных документов [1], проводятся до образования на испытываемой поверхности питтинговых повреждений, охватывающих определенную долю полоски контакта. Такой подход вполне объясним в тех случаях, когда речь идет о ресурсной оценке стойкости подшипников качения и других

подобных узлов, работающих в узком интервале допусков на размеры сопрягаемых деталей. Во многих случаях, контактная усталость, является основным эксплуатационным фактором отказа деталей, работа которых может продолжаться с достаточно высокими степенями контактного изнашивания нагружаемой поверхности. К такому классу деталей можно отнести матрицы и пуансоны, осуществляющие холодную объемную деформацию металла. При изготовлении достаточно крупных поковок, например головок болтов М12...М16, а также однотипных гаек, допуски на отдельные размеры таких изделий могут достигать 0,2 и более мм. Очевидно, что при определенных условиях упрочнения рабочей поверхности штампов, их изнашивание может происходить с равномерным углублением гравюры штампа, обеспечивая достаточно долгий период работы инструмента, изготовляющего годную поковку. Для обеспечения заданных условий изнашивания, необходимо понимать какие механизмы структурных изменений оказывают влияние на способность поверхности штампа противостоять контактному изнашиванию, а также изнашиваться с заданной интенсивностью и равномерно по всей рабочей поверхности, без образования глубоких трещин контактной усталости, развивающихся внутрь материала [2, 3].

Экспериментальные исследования процесса изнашивания образцов проводили на установке для испытаний на контактную усталость и износ [4]. Установка обеспечивает контактное нагружение торцевой поверхности плоской части образца за счет его прокатывания по рабочей поверхности дискового контртела с линейной скоростью 0,035 м/с. С целью моделирования контактного взаимодействия при трении без проскальзывания, контртело в виде диска крепится на шарикоподшипнике в державке штока, а образец с плоской рабочей поверхностью – в ячейке вращающейся планшайбы. Перемещение образца по круговой траектории при встрече с подпружиненным штоком, на котором закреплен диск контртела, вызывает его проворачивание, исключая проскальзывание на контактных поверхностях. В нижней точке траектории рабочая часть образца окуналась в поддон с технологической смазкой «Росойл–ШОК» ТУ 0258–001–06377289–94. Материал контртела – сталь Р6М5 твердостью 64...65 HRC. Ширина контртела и толщина рабочей части образца образуют площадку контакта 2 мм² (рисунок 1). Схема испытания реализует пульсирующее контактное нагружение по полоске, которое применяется при исследовании изнашивания материалов, как в условиях качения, так и скольжения в зоне контакта [5].



a)



б)

Рисунок 1 – Фотография (а) и схема (б) взаимодействия образца и дискового контртела в процессе проведения испытания на контактную усталость

Контактная выносливость образца оценивается по количеству циклов нагружения при заданном уровне контактной нагрузки и достижении глубины лунки износа 0,60 мм, или при достижении 30 000 циклов нагружения. При этом величина контактного напряжения регулируется силой предварительного сжатия пружины, которая удерживает шток с контртелом.

Глубина образующейся лунки на торцевой поверхности образца отражает степень усталостного повреждения материала [6]. Её определение проводят путем прямого замера глубины лунки износа с помощью индикатора часового типа с точностью 0,01 мм. Полученные значения сравнивают с результатами измерения глубины лунки на инструментальном микроскопе при 50–ти кратном увеличении. Каждая партия, подвергнутая испытаниям, состоит из 8–ми образцов. Статистическую обработку результатов испытаний для каждого уровня наработки проводят путем интервальной оценки математического ожидания величины износа с помощью критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,95.

На основании результатов испытаний строятся кривые, отражающие зависимость глубины образующейся лунки от числа рабочих циклов при заданной контактной нагрузке [7].

Возможность обработки боковых поверхностей плоской рабочей части образца с жестким базированием и применением современного оборудования для подготовки микрошлифов, позволяет осуществлять мониторинг накопления усталостных повреждений и изменения структуры по сечению рабочей части образца с применением оптического микроскопа [8].

Для верификации методики испытаний, проведено численное моделирование процесса нагружения образца. Напряженно–

деформированное состояние его рабочей части отличается характерным для объемной физической модели распределением. В отличие от плоской модели, примененной для численного моделирования в работе [5] трехмерное моделирование отражает перераспределение напряжений на поверхности контакта, обусловленное наличием конструктивных концентраторов напряжений – боковых кромок полосы контакта на торцевой поверхности образцов. Подобное граничное условие характерно для работы штампового инструмента в зонах контакта гравюры с внешними контурами материала заготовки.

Тестовый расчет в случае приложения к контактной поверхности образца нормального напряжения 1300 МПа, показывает, что в начальный момент испытаний уровень максимальных эквивалентных напряжений составляет порядка 1270 МПа. Зона концентрации находится на пересечении рабочей и боковой поверхностей образца. В центре полосы контакта напряжения снижаются до 1000 МПа (рисунок 2а). Граница между областью рабочей поверхности с приложенной контактной нагрузкой и без неё находится под действием максимальных касательных напряжений, значения которых достигают 500 МПа (рисунок 2б). Зоны концентрации касательных напряжений расположены в глубине металла под крайними точками приложения нагрузки к поверхности образца (рисунок 2в). В этих зонах происходит зарождение и рост трещин контактной усталости (рисунок 2г).

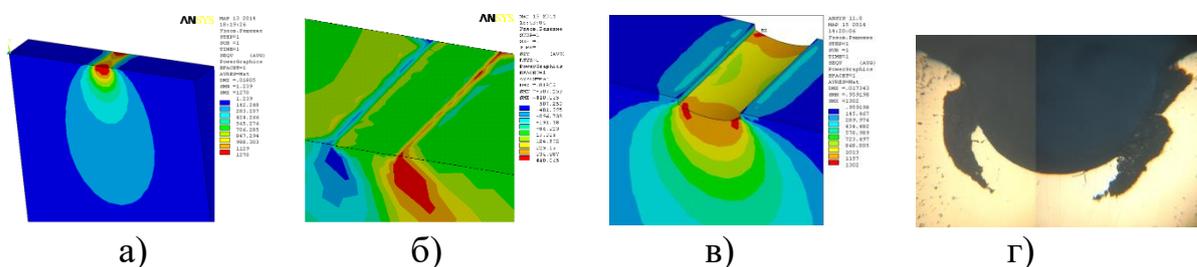


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных (а) и касательных (б) напряжений по рабочей поверхности образца в начальный момент испытаний, эквивалентных напряжений при глубине лунки 0,2 мм (в) и характер распространения трещин в экспериментальном образце (г)

Величина касательных напряжений ответственных за протекание микропластических деформаций под контактной поверхностью, при глубине лунки до 0,2 мм остается на уровне 500 МПа (рисунок 3а). При углублении лунки свыше 0,2 мм отмечается рост напряжений до 1100 МПа при глубине лунки 0,6 мм [9]. Аналогичная закономерность отмечена для сдвиговых деформаций (рисунок 3б), которые изменяются в диапазоне 0,6–1,3%. Таким образом, испытания, проводимые с изнашиванием контактной поверхности на глубину до 0,2 мм, что соизмеримо с максимальным допуском на линейные размеры рабочих поверхности большинства инструментов для холодной штамповки, будут осуществляться при

неизменных граничных условиях. В пользу этого утверждения свидетельствуют зависимости, отражающие изменение эквивалентных напряжений и деформаций, которые также являются критерием оценки материала сопротивляться контактному изнашиванию (рисунок 4) [10]. Увеличение глубины лунки свыше 0,2 мм не только увеличивает концентрацию всех отмеченных напряжений и деформаций, но и приводит к локализации зоны максимальных эквивалентных напряжений в области действия максимальных касательных напряжений (рисунок 3а).

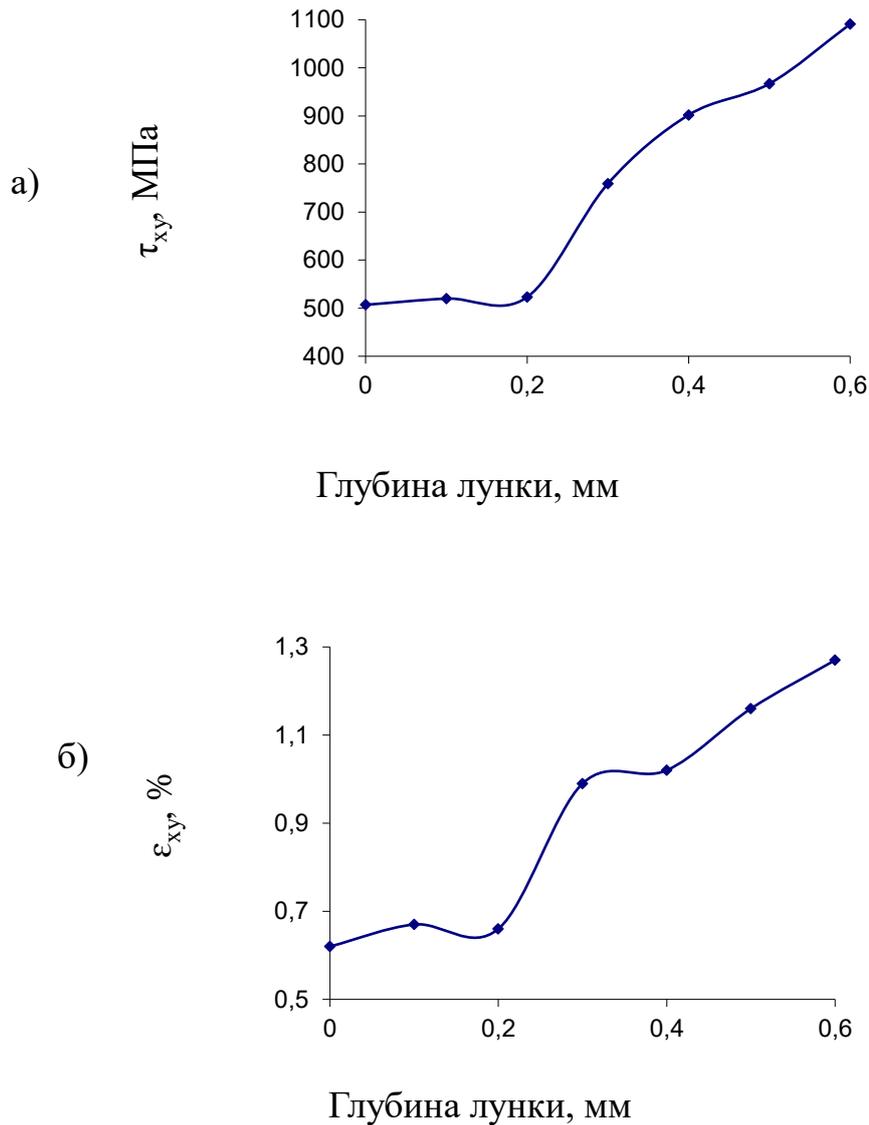


Рисунок 3 – Изменение касательных напряжений τ_{xy} (а) и сдвиговых деформаций ϵ_{xy} (б) в боковой плоскости рабочей части в зависимости от глубины лунки

Проведение испытаний при глубинах лунки более 0,2 мм также актуально, поскольку локальное перераспределение нагрузок по рабочим поверхностям большинства штампового инструмента приводит к избирательному изнашиванию его гравюры, а это в свою очередь создает локальную концентрацию напряжений в области образующегося дефекта. Кроме того, анализ интенсивности износа, проводимый параллельно с оценкой структурных изменений в поверхностном слое металла, позволяет выявить механизм разрушения модифицированного слоя, а также его взаимодействие с материалом сердцевины с учетом градиента свойств по сечению упрочненного материала.

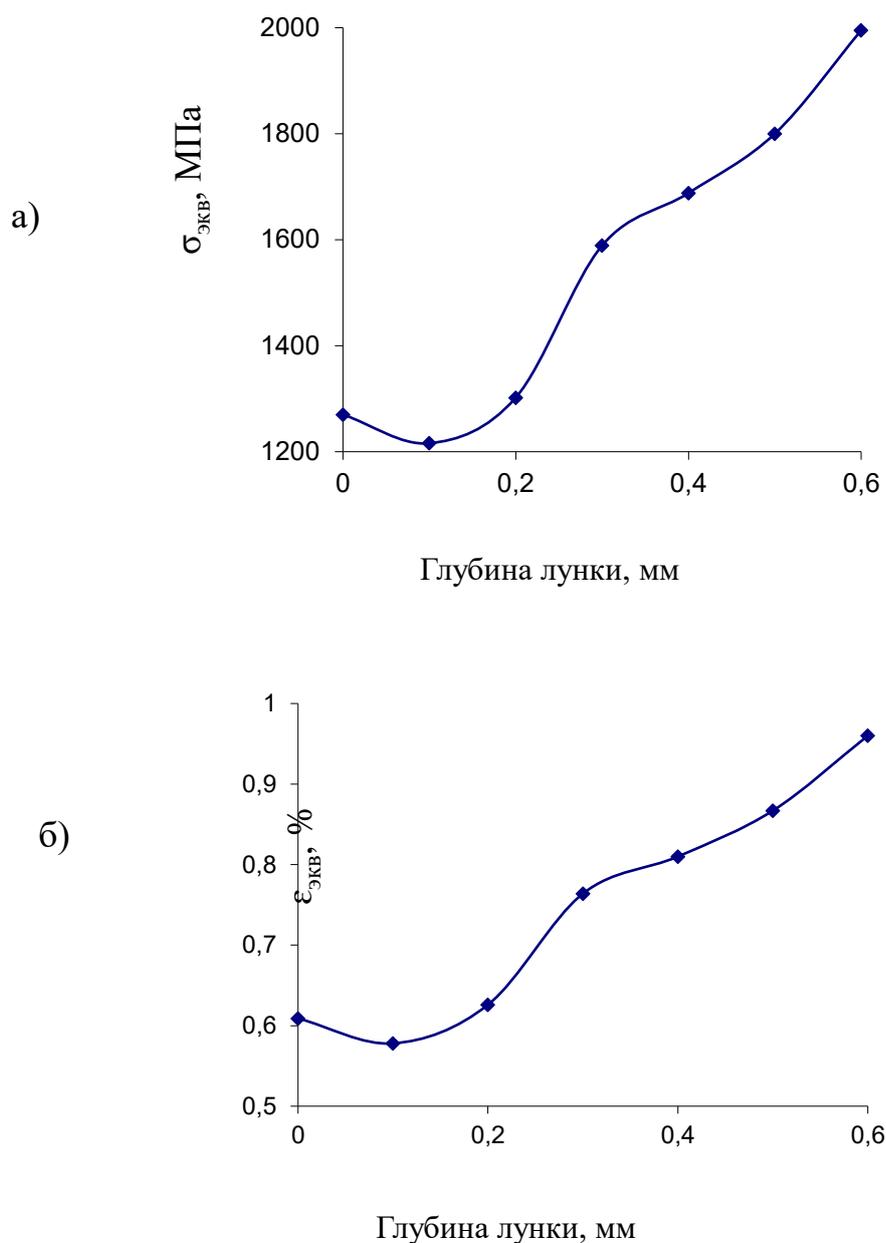


Рисунок 4 – Изменение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (а) и деформаций $\epsilon_{\text{экв}}$ (б) в боковой плоскости рабочей части в зависимости от глубины лунки

Исходя из результатов моделирования, можно заключить, что начальные периоды испытаний образцов, будут отличаться низкими интенсивностями изнашивания. При этом энергия внешнего воздействия на поверхностный слой металла будет затрачиваться на работу внутрикристаллической деформации. Ее влияние на структурные изменения в поверхностном и подповерхностном слое металла, будут определяться именно усталостными процессами, на первом этапе дислокационными. Длительность этого этапа испытаний без образования крупных подповерхностных трещин, можно считать периодом, в течение которого эксплуатация определенной детали будет происходить без изменения геометрических характеристик контактной поверхности. По нашему мнению, такой период эксплуатации применительно к штамповой оснастке, можно считать периодом прецизионной стойкости. В течение такого периода, все геометрические размеры изготавливаемой поковки будут наиболее близки к требованиям чертежа.

Нами ранее были проведены исследования интенсивности изнашивания стали 5ХВ2С с поверхностно–упрочненным слоем [11]. Объемно–поверхностное упрочнение заключалось в последовательном проведении термомеханической обработки (перекова), химико–термической обработки (нитроцементации), закалки и низкотемпературного отпуска. Отличительным параметром такой комбинированной обработки, являлась одинаковая температура химико–термической обработки (ХТО) и последующей закалки – 860°С. Это позволило производить закалку образцов непосредственно с температуры диффузионного насыщения. Варьируемыми параметрами были: длительность ХТО (6 и 8 часов), а также применение предварительного перекова. Все образцы, были разделены на две одинаковых партии, одна из которых подвергалась перекову, другая имела исходную структуру, полученную прокаткой заготовки – прутка.

Результаты испытаний представлены на рисунке (рисунок 5). Из них видно, что обе партии образцов, упрочненные посредством нитроцементации на начальном периоде испытаний, демонстрируют высокую стойкость к воздействию пульсирующей нагрузки с амплитудой 1100 МПа. Некоторые различия в длительности периода прецизионной стойкости, объясняются влиянием предварительной термомеханической обработки. Структура заготовки, подготовленная с помощью перекова, имеет преимущество перед текстурированным металлом, полученным с помощью прокатки. Эта особенность обусловлена более равномерным распределением всех компонентов сплава, что в свою очередь дает

возможность получения более качественного композиционного материала в области упрочненного слоя.

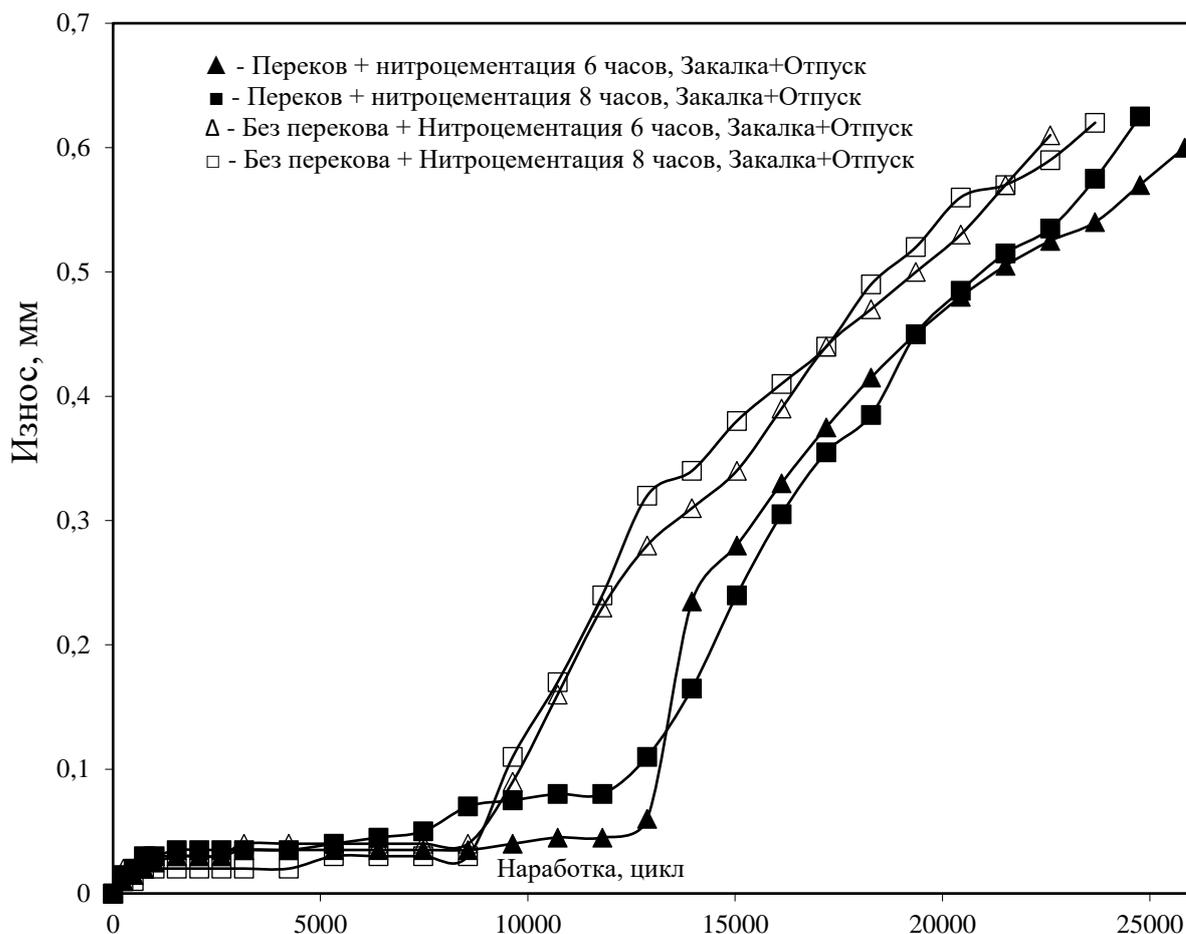


Рисунок 5 – Кривые износа образцов из стали 5ХВ2С при различных режимах упрочняющей обработки. Амплитуда пульсирующего контактного напряжения – 1100 МПа

Вывод: предложенная методика ресурсной оценки стойкости материалов к контактному изнашиванию может применяться в качестве альтернативного метода оценки контактной выносливости. Ее преимуществом является возможность оценки взаимосвязи между уровнем поврежденности поверхностного слоя и его стойкости к действию пульсирующих контактных напряжений. Испытания, которые продолжаются после образования первых питтингов, позволяют получить ценную практическую информацию о закономерности изнашивания поверхностно–упрочненных слоев с развитой структурной композицией. Полученные результаты полезно учитывать при проектировании различного штампового инструмента, особенно в тех случаях, когда эксплуатационные нагрузки на гравюру штампа, локализируются в небольшом по толщине поверхностном слое. Такой подход позволяет создавать направленные по

структуре и свойствам упрочненные слои на доступных и сравнительно недорогих экономнолегированных сталях. Основной объем такого инструмента, имеющий дешевую основу, не подвергается экстремальным нагрузкам, а поверхностный слой за счет имплантации легких элементов, в первую очередь, азота и углерода, адаптирован условиям эксплуатации такого штампа. При этом, достаточно оперативные испытания, которые можно провести на лабораторных образцах, позволяют получить представление о механизме изнашивания конкретного композиционного материала упрочненного слоя, и при необходимости внести корректировки в технологию упрочнения с последующей перепроверкой принятых технологических рекомендаций.

Список литературы

1. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость: Р 50–54–30–87: введ. 8.12.87. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: ВНИИНМШ, 1988. – 65 с.
2. Chunhui L. Modeling the Behavior of Inclusions in Plastic Deformation of Steels: Doctoral Thesis: 05.2001/Stockholm: Division of Materials Forming Department of Production Engineering Royal Institute of Technology, 2001. 64p.
3. Fajdiga G., Glodez S., Kramar J. Pitting formation due to surface and subsurface initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements // Wear. – 2007. Vol. 262, iss 9–10. – P. 1217–1224.
4. Патент Республики Беларусь на полезную модель №8260. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ / Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Кенько В.М., Панкратов И.А., Степанкина Л.В. Бюл. № 3. 2012.
5. Beheshti Ali, Khonsari M.M. On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect/ Tribology International. 2011. vol. 44. – P. 1620–1628.
6. Степанкин И.Н., Поздняков Е.П. К вопросу влияния диффузионного упрочнения на механизм контактного изнашивания экономнолегированных сталей / Сборник научных трудов «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, 2014. Кн. 1. – С. 395–409.
7. Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Романенко Д.Н. К вопросу контактного изнашивания карбонитридных и карбидных слоев легированных конструкционных сталей 35ХГСА и 40Х / Сборник научных трудов «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, 2016. Кн. 1. – С. 239–247.

8. Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 / Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. №1. – С. 19–26.

9. Пантелеенко Ф.И., Степанкин И.Н. К вопросу исследования процесса контактного изнашивания машиностроительных материалов / Сборник научных трудов «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, 2016. Кн. 1. – С. 256–260.

10. Семенов М.Ю., Гаврилин И.Н., Рыжова М.Ю. Анализ способов упрочнения зубчатых колес из теплостойких сталей на основе расчетного метода / Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 1. – С. 42–46.

11. Naizabekov A., Stepankin I., Pozdnyakov E., Lezhnev S., Kuis D., Panin E. Effect of surface modification of 5KHV2S steel on the mechanism and intensity of contact wear / Metalurgija. 2024. №63. – P. 279–282.