

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ДИФфуЗИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЗМ КОНТАКТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Учреждение образования “Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого”
г. Гомель, Беларусь

В работе проведены сравнительные исследования контактного изнашивания инструментальной стали 9ХС и стали 40Х с упрочненным слоем. Выявлен механизм разрушения поверхностных слоев. Показаны различия между однородным материалом и материалом с градиентом свойств по сечению.

A comparative study of contact wear tool steel 9XC and steel 40X with hardened layer. Identified the mechanism of destruction of the surface layers. Shows the differences between homogeneous material and materials with gradient properties section.

Введение

Работоспособность большого количества деталей машин определяется способностью материала противостоять контактному изнашиванию. Оно имеет усталостную природу и проявляется в виде образования питтингов [1, 2]. Усталостное изнашивание наблюдается на рабочих поверхностях подшипников качения, зубьях шестерен и других деталях. Многократное пульсирующее нагружение поверхности детали приводит к повторяющейся деформации, вызывающей появление микротрещин. Их рост сопровождается выкрашиванием частиц металла и постепенному отслоению поверхностного слоя. Питтинги изменяют геометрию детали и естественно, перераспределяют напряжения, приложенные к взаимодействующим деталям. При неизменных внешних давлениях на контактирующие тела в окрестности питтингов создаются условия для концентрации напряжений по мере эволюции контактной поверхности детали.

Подобные дефекты для многих деталей машин являются достаточно значимыми, существенно изменяющими эксплуатационные характеристики всего узла. Это, в первую очередь, относится к прецизионным деталям топливной аппаратуры современных дизельных двигателей. Незначительный износ контактной поверхности деталей, управляющих распределенным впрыском топлива, приводит к нарушению закономерности подачи топлива и, как правило, устраняется путем замены или ремонта изношенных деталей [3]. Подшипники качения, а также поверхности зубьев шестерен, допускают незначительные искажения профиля контактных поверхностей сопряженных деталей, продолжая выполнять свою функцию до появления износа, существенно превышающего повреждение деталей топливной аппаратуры. Величина предельного износа поверхностей зубчатых передач достигает 20–30 % модуля зубчатого зацепления. Эксплуатация зубчатых колес происходит в области многоциклового усталости, когда повреждение поверхности наступает после длительного периода работы, а проявления износа на момент отказа детали не охватывает более 30 % контактной поверхности [4].

Гораздо более значительный износ допускается на рабочих поверхностях штампового инструмента. Размеры поковки, как правило, имеют допуски на изготовление, измеряемые несколькими десятками миллиметра. Зачастую направленное изнашивание гравюры штампа не сопровождается искажением формы рабочей поверхности, что позволяет сохранять геометрию поковки и эксплуатировать инструмент длительный период. Износ гравюры в подобных случаях, исчисляемый по нормали к формообразующей поверхности, может достигать 0,3 мм и более [5].

В работе рассмотрены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния поверхности материала в условиях зарождения и роста питтинга, а также проведен сопоставительный анализ контактной выносливости экономно-легированных сталей с поверхностно-упрочненным слоем и инструментальных сталей, применяемых для изготовления мелкоразмерного штампового инструмента.

Объекты и методики исследований

Объектами исследований являются поверхностные слои инструментальной (9ХС) и легированной (40Х) сталей, подвергаемые испытанию контактной нагрузкой. Исследование контактного изнашивания поверхностных слоев материалов проводили с помощью установки для испытаний на контактную усталость и износ [6]. В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [7], данная установка обеспечивает пульсирующее нагружение испытываемой поверхности без проскальзывания или с его реализацией, при контакте по полоске. Размеры полоски на испытываемой поверхности экспериментального образца заданы толщиной его рабочей части и шириной рабочего пояса дискового контртела. Рабочая часть экспериментального образца выполнена в виде лопатки с плоской торцовой поверхностью, на которую оказывается воздействие путем приложения пульсирующего контактного напряжения величиной до 5000 МПа. Боковые поверхности рабочей части образца подвергнуты полировке, что позволяет проводить мониторинг структурных изменений в области лунки износа по мере ее роста и строить кривые роста глубины лунки по мере увеличения количества циклов нагружения.

Анализ напряженно-деформированного состояния материалов проведен с помощью метода конечных элементов. Компьютерная модель, представленная в виде геометрической реконструкции рабочей части образца, нагружалась давлением 1300 МПа, равномерно распределенным по поверхности контакта площадью 2 мм². Это значение соответствует величине площади контакта на экспериментальном образце. Указанная величина контактного давления соизмерима со значением напряжения, при котором наблюдается высокая износоустойчивость высоколегированной стали Р6М5 [8]. Деформацию материала образца считали абсолютно упругой. Это обусловлено высокой твердостью материалов и обосновано в работе [9]. Модуль упругости материала образца принимали равным $2,11 \times 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона — 0,3. Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Метам РВ-22М.

Результаты исследований и их обсуждение

Наиболее высокие по величине контактные напряжения возникают на поверхностях инструмента для холодной объемной штамповки. При изготовлении мелких поковок пульсирующие нагрузки составляют порядка 1000 МПа и не требуют использования высоколегированных сталей для изготовления инструмента [10, 11]. Для мелкоразмерного штампового инструмента принято использовать углеродистые и легированные инструментальные стали с содержанием углерода, близким к 1 % и суммарным содержанием легирующих элементов 3–5 %. Наибольшее распространение получили недорогие углеродистые стали У8А – У10А, а также ХВГ, 9ХС и др. При изготовлении деталей штамповой оснастки, осуществляющей отделочные операции холодной высадки и чеканки, большое значение имеет пластичность инструментальной стали в холодном состоянии. Это связано с необходимостью получения гравюры штампового инструмента холодным выдавливанием [12, 13]. В этом случае проблема получения заданного уровня пластичности инструментальной стали на предварительном этапе изготовления заготовки штампа является ответственной производственной задачей. Уровень пластичности традиционно используемых инструментальных сталей регламентируется твердостью, которая может быть понижена отжигом до величины 187 НВ [13]. Дополнительным требованием является получение структуры зернистого перлита [14]. Это существенно осложняет технологию производства инструмента из-за необходимости контроля упрочнения инструментальной стали на стадии выдавливания гравюры. Структурные дефекты, возникшие в процессе деформации упрочнившегося сплава, могут привести к образованию термических трещин после окончательной термообработки инструмента. Проведение промежуточных отжигов еще больше усложняет технологический процесс изготовления сложнопрофильных деталей, например, отделочных пуансонов для холодной высадки крестовых и прямолинейных шлицев на головках винтов-саморезов.

По показателю технологической пластичности в холодном состоянии среднеуглеродистые экономно-легированные

стали существенно превосходят стали с содержанием углерода, близким к 1 %. Учитывая, что наиболее высокая твердость должна быть создана в поверхностном слое инструмента глубиной порядка 1 мм, возможно использование указанных сталей для изготовления мелкогабаритного инструмента при условии науглероживания поверхностного слоя путем цементации или цианирования. Очевидно, что критерием для возможности замены инструментальных сталей экономно-легированными с диффузионно-упрочненным слоем будет служить износоустойчивость этих материалов при воздействии на них контактной пульсирующей нагрузки, в том числе с учетом концентрации напряжений в окрестности лунки износа.

Результаты исследования влияния пульсирующего контактного давления на рабочую часть экспериментального образца представлены на рис. 1. Видно, что окрестность грани, образованной пересечением торцевой поверхности образца с его боковыми плоскостями находится в зоне действия максимальных по величине эквивалентных напряжений и деформаций, рассчитываемых по теории Мизеса (рис. 1 а, б).

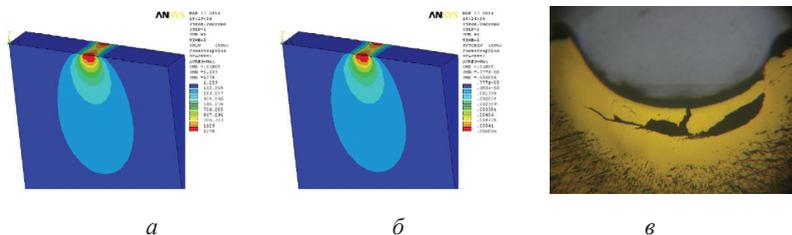


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) по рабочей поверхности образца для проведения исследований на контактное изнашивание в начальный момент испытаний и характер распространения приповерхностных трещин в образце из стали 9ХС (в)

Величина эквивалентных напряжений на краях образца достигает 1270 МПа, а в центре площадки снижается до 1000 МПа. Обнаруженный градиент распределения идентичен для эквивалентных деформаций (рис. 1б). Их максимальная величина — 0,60 % возникает в окрестности острой грани образца. В центре площадки контакта величина деформаций снижена до 0,46 %. Зона, охваченная максимальными эквивалентными напряжениями

и деформациями, располагается не только на торцевой поверхности образца, но и на боковой плоскости, к которой контактная нагрузка не прикладывается. Размеры и конфигурация данной зоны имеют полукруглые очертания, границы которого совпадают с направлением роста приповерхностных трещин в процессе контактного изнашивания образца — рис. 1в.

Граница между областью рабочей поверхности с приложенной контактной нагрузкой и без нее находится под действием высоких касательных напряжений. Как видно из рис. 2а, их значения достигают порядка 500 МПа. Очаги концентрации касательных напряжений, возникающих на боковой поверхности рабочей части образца, располагаются в глубине металла под крайними точками приложения нагрузки к поверхности образца. Именно в этих зонах происходит зарождение и рост трещин контактной усталости, о чем свидетельствует распределение сдвиговых деформаций, рис. 2б. Сделанный вывод, подтверждается механизмом разрушения поверхности образцов рис. 1в.

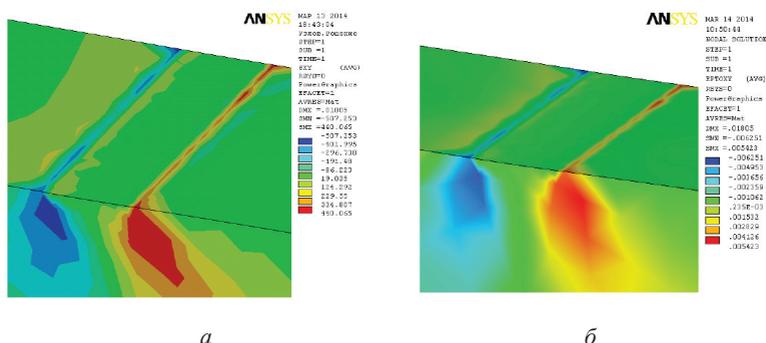


Рис. 2. Распределение касательных напряжений (а) и сдвиговых деформаций (б) в боковой плоскости рабочей части образца в начальный момент испытаний

Испытания инструментальной стали 9ХС показали, что контактное напряжение величиной 1100 МПа, не вызывает существенных разрушений поверхностного слоя металла в течение 25 тысяч циклов нагружения (рис. 3). После периода приработки образованная лунка глубиной не более 0,1 мм не изменяет своей формы и размеров. Структурные повреждения

в окрестности контура лунки по мере увеличения наработки образцов не обнаружены. Влияние режимов закалки практически не изменило характера изнашивания образцов, несмотря на то, что охлаждение в воде обеспечило незначительное повышение твердости металла. Применение криогенной обработки после закалки в масле также повысило твердость по сравнению с образцами, которые не подвергались обработке холодом (табл.). После 25 тысяч циклов нагружения в окрестности дна лунки отмечено зарождение и рост глубоких трещин (рис. 4). С их появлением изнашивание материала образцов резко интенсифицировалось.

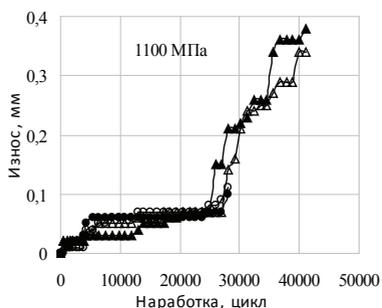


Рис. 3. Кривые контактного изнашивания образцов из стали 9ХС, закаленных в масле (●○) и воде (▲△). Однотонные маркеры отражают износоустойчивость образцов, подвергавшихся дополнительной обработке холодом

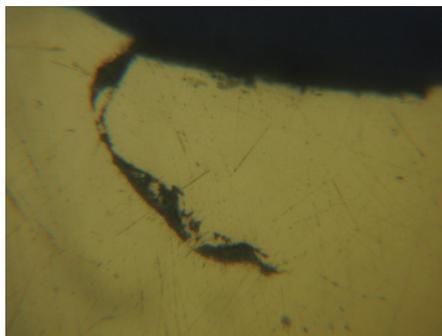


Рис. 4. Трещины в окрестности дна лунки износа в образцах из стали 9ХС (×200)

Таблица

Режимы термической обработки образцов из стали 9ХС

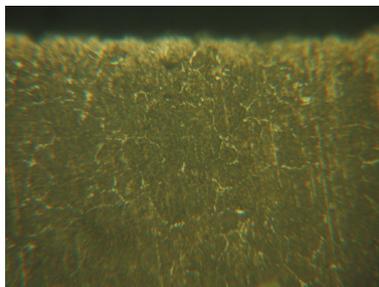
Номер партии образцов	Термическая обработка				Твердость, HRC
	Температура заковки, °С	Охлаждающая среда	Криогенная обработка	Температура отпуска, °С	
1	860	вода	—	200	60–61
2			–196		60–61
3		масло	—		58–59
4			–196		59–60

На основании полученных результатов выявлено, что нагружение пульсирующим давлением величиной 1100 МПа позволяет получить период работы с минимальным износом поверхности на протяжении 25 тысяч циклов. Это соответствует четырем часам непрерывной работы современного холодновысадочного оборудования с частотой 100 ударов в минуту.

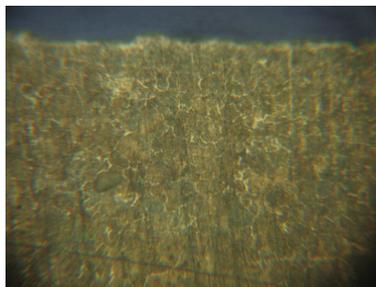
Для оценки контактной выносливости экономнолегированных сталей использовали экспериментальные образцы из стали 40Х. Их упрочнение проводили путем науглероживания и цианирования. В первом случае в качестве насыщающей среды использовали древесный уголь, модифицированный углекислым барием, во втором, древесный уголь модифицировали мочевиной. Длительность насыщения в обоих случаях составляла 12 часов при температуре 920 °С. После химико-термической обработки проводили закалку в масле с температуры 860 °С и низкотемпературный отпуск. Часть образцов для устранения остаточного аустенита после заковки в масле подвергали дополнительной обработке холодом.

Структура поверхностного слоя образцов стали 40Х характеризуется мартенситным строением с ледебуритной сеткой по границам зерен (рис. 5). Толщина слоя, имеющего заэвтектоидную структуру, составляет порядка 0,4 мм. Различия в строении слоев, полученных в результате науглероживания и цианирования, отсутствуют, что объясняется высокой степенью абсорбции углерода в результате высокой температуры химико-термической обработки. Распределение микротвердости по сечению упрочненного слоя показывает, что общая глубина

модифицированного слоя составляет не менее 1,5 мм (рис. 6). Микротвердость поверхности составляет около 8000 МПа. Изменение твердости по сечению слоя отражается плавной зависимостью вплоть до микротвердости сердцевины — 5500 МПа.

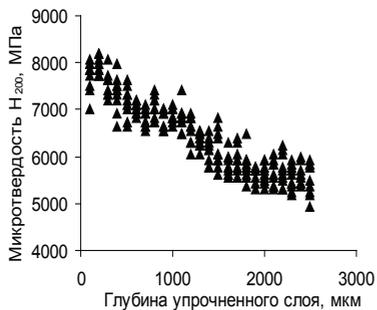


Цементация

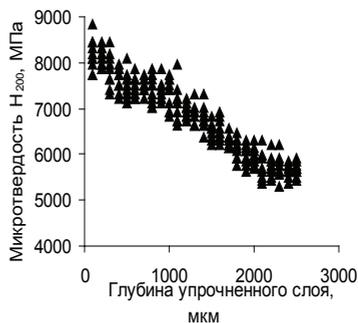


Цианирование

Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя стали 40X после химико-термической и термической обработок ($\times 200$)



Цианирование



Цементация

Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению упрочненных образцов из стали 40X

Анализ кривых контактного изнашивания карбидных и карбонитридных слоев стали 40X показывает, что при напряжениях порядка 1300 МПа, изнашивание всех без исключения образцов отражается монотонно возрастающей зависимостью, рис. 7.

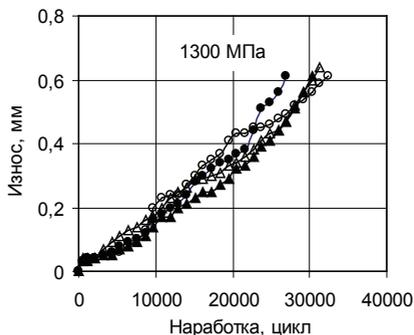


Рис. 7. Кривые контактного изнашивания образцов из стали 40X упрочненных цианированием (●○) и цементацией (▲△). Однотонные маркеры отражают износоустойчивость образцов, подвергавшихся дополнительной обработке холодом

Согласно ГОСТ 21354-87 твердость прямо пропорционально пределу ее контактной выносливости:

$$\sigma_{\text{Hlim}} = 23 \text{ HRC}. \quad (1)$$

В работах [15, 16] обосновано применение зависимости, полученной на основе уравнения (1), для расчета предела контактной выносливости упрочненных слоев:

$$\sigma_{\text{Hlim}} = 1,25 \text{ HV}. \quad (2)$$

Принято считать, что процесс контактного изнашивания протекает в три этапа. На первом этапе происходит приработка контактной поверхности, на втором — накопление внутренних повреждений без видимого прироста износа и на третьем — интенсивный рост и объединение приповерхностных трещин с интенсификацией изнашивания поверхностного слоя [17].

Как видно из рис. 3, указанные этапы в полной мере находят свое отражение в поведении высокоуглеродистой стали 9ХС, испытанной при контактном напряжении 1100 МПа. Согласно зависимости (1), предел ее контактной выносливости должен составлять 1300–1400 МПа. Воспользовавшись таблицами для перевода чисел твердости получим, что твердость по Виккерсу стали 9ХС составляет 655–715 HV, откуда, согласно зависимости 2, предел контактной выносливости стали 9ХС должен составлять 818–893 МПа. Полученные значения суще-

ственно ниже тех, которые получены исходя из чисел твердости, выраженных в единицах Роквелла. Анализ кривых изнашивания показывает, что потеря несущей способности поверхностным слоем стали 9ХС происходит гораздо раньше, чем того требует методика определения предела контактной выносливости [7]. Это позволяет сделать вывод, что в условиях нагружения по полоске с приложением контактной нагрузки через дисковое контртело на плоскую поверхность экспериментального образца усиливается влияние напряженно-деформированного состояния в окрестности полоски контакта. Как видно из рис. 2, максимальные касательные напряжения и сдвиговые деформации, возникают в обширных зонах под поверхностью контакта, вызывая накопление внутренних повреждений в металле. Величина предела выносливости, рассчитанная по зависимости (2), в этом случае имеет большую достоверность, по отношению к применяемой схеме испытания экспериментальных образцов.

В соответствии с зависимостью (1) предел контактной выносливости для образцов из стали 40Х составляет 1000 МПа. Твердость поверхностного слоя, измеренная на приборе Роквелла, составила 63–66 HRC. Величина предела выносливости, определенная по зависимости (2), составляет 1450–1500 МПа. Исходя из полученного значения, разрушение науглероженного слоя при контактом изнашивании под действием пульсирующего напряжения 1300 МПа (рис. 7) должно иметь три характерных этапа, отмеченных для стали 9ХС [17]. При этом высокая твердость науглероженного слоя в силу его низкой податливости должна обеспечить хорошее сопротивление зарождению начальных трещин и сравнительно низкое сопротивление их распространению [18]. Т.е. после этапа начальной приработки вполне закономерно ожидать длительный период нагружения поверхностного слоя без существенного прироста лунки износа. Как видно из рис. 7, указанное предположение не находит практического отражения в результатах эксперимента. Изнашивание всех образцов из стали 40Х с диффузионно-упрочненным слоем отражается монотонной зависимостью. В процессе формирования лунки износа профиль ее дна приобретает криволинейную форму, которая отражает приработку контактной поверхности

контртела. Как видно из рис. 8а, в окрестности внешних краев лунки, в зонах концентрации касательных напряжений в соответствии с рис. 2, возникают дефекты в виде пор, на месте выкрошившихся частиц металла. Изнашивание металла по дну лунки происходит за счет его наклепа и последующего отслаивания, рис. 8б.

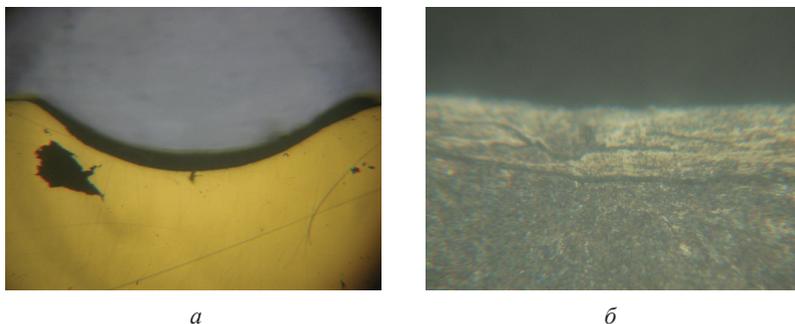


Рис. 8. Внешний вид лунки износа упрочненного слоя стали 40X — *a* ($\times 60$) и структура наклепанного слоя вдоль образующей дна лунки износа — *б* ($\times 600$) после 8640 циклов испытания

По мере увеличения количества циклов нагружения изнашивание поверхностно-упрочненного слоя происходит за счет объединения мелких трещин и отслаивания наклепанных частиц металла. Предельное количество циклов нагружения для всех исследованных образцов составило 25–30 тысяч циклов. Глубина лунки износа в этот момент составила около 0,6 мм, после чего механизм разрушения контактного слоя изменился с учетом снижения жесткости слоя металла, расположенного в окрестности дна лунки. Различие в твердости наружного слоя, имеющего заэвтектоидное строение, и внутреннего подслоя привело к зарождению и быстрому распространению горизонтальных трещин, отделяющих наружный подслоя (рис. 9).

Сравнение карбидных и карбонитридных слоев стали 40X, полученных высокотемпературным процессом, показало, что их способность сопротивляться контактному изнашиванию практически одинакова. Применение криогенной обработки для устранения влияния остаточного аустенита не отразилось на контактной выносливости поверхностных слоев. Основным

различием между карбидным и карбонитридным упрочнением является повышение коррозионной стойкости поверхностных слоев, синтезированных цианированием, что отмечено их пониженной травимостью в стандартном травителе — 5-ти % растворе HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})$.

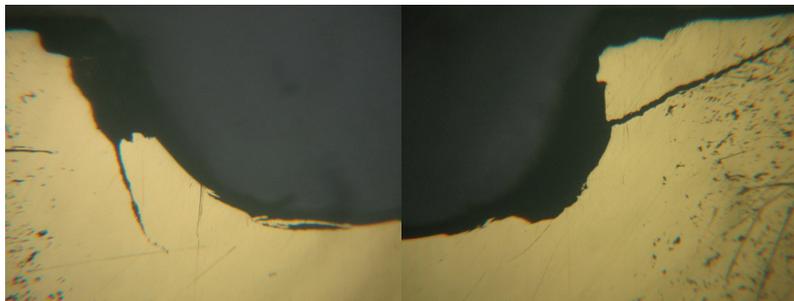


Рис. 9. Внешний вид лунки износа упрочненного слоя стали 40X — 30240 циклов испытания ($\times 80$)

Заключение

Полученный результат показывает, что предельный износ упрочненного слоя стали 40X составляет порядка половины толщины модифицированного слоя. Изнашивание карбидных и карбонитридных слоев протекает равномерно до момента зарождения горизонтальных трещин внутри упрочненного слоя. Их распространение происходит за пределы очага износа, отделяя более твердую часть упрочненного слоя, характеризующуюся заэвтектидным строением. Сравнение кривых изнашивания сталей 40X с упрочненным слоем и 9ХС показывает, что в условиях локального нагружения поверхностного слоя характер изнашивания стали 9ХС отличается нелинейной зависимостью. При достижении 25 тысяч циклов начинается интенсивное изнашивание за счет отделения с поверхности испытуемого образца крупных частиц металла.

Расчетные значения предела контактной выносливости, определенного для сталей 40X с упрочненным слоем и 9ХС без упрочнения в соответствии с ГОСТ 21354-87, оказались завышенными для испытания данных сталей в условиях локального контактного нагружения их поверхности по полоске.

Зависимость изнашивания карбидных и карбонитридных слоев стали 40X, отражающая монотонный прирост износа до уровня, соизмеримого с половиной толщины упрочненного слоя, позволяет использовать указанный материал для упрочнения деталей машин и технологической оснастки, работающих в условиях контактного нагружения при пульсирующих напряжениях свыше предела контактной выносливости.

Список использованных источников

1. Богданович П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак — Мн.: Выси. шк. — 1999. — 374 с.
2. Пинегин С.В. Контактная прочность в машинах / С.В. Пинегин — М.: Машиностроение. — 1969. — 243 с.
3. Степанкин, И.Н. Упрочнение деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей при их восстановлении / И.Н. Степанкин, Д.Л. Стасенко, Л.В. Степанкина // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2010. — № 11. — С. 28–32.
4. Леликов О.П. Прогнозирование ресурса передаточных механизмов по критерию износа / О.П. Леликов, Б.П. Нахесткин // Инженерный журнал. Справочник, 1990. — № 5. — С. 24–31.
5. Кенько В.М. Влияние напряженного состояния и градиента свойств на характер разрушения и стойкость холодновысаочных матриц / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. — 2000. — № 1. — С. 26–32.
6. Пат. Республ. Беларусь на полезную модель №8260 МПК (2009) G 01 N 3/00 Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ / И.Н. Степанкин, Е.П. Поздняков, В.М. Кенько, И.А. Панкратов, Л.В. Степанкина; заявитель Гомельск. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. — № и20110940, заявл. 23.11.2011. опубли. // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2012. — № 3. — С. 260.
7. Р 50-54-30-87 Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость.
8. Степанкин И.Н. К вопросу исследования контактной выносливости быстрорежущей стали Р6М5 / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько, Е.П. Поздняков, А.И. Камко // Вестник ПГУ. — 2012. — № 3. — С. 39–45.
9. Кремнев Л.С. Особенности разрушения инструментальных материалов / Л.С. Кремнев // Металловедение и термобработка металлов. — 1994. — № 4. — С. 17–22.
10. Трахтенберг Б.Ф. Стойкость штампов и пути ее повышения / Б.Ф. Трахтенберг. — Куйбышевское книжное издательство, 1964. — 280 с.
11. Позняк Л.А. Штамповые стали / Л.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишаев. — М.: Металлургия, 1980. — 244 с.

12. Бунатян Г.В., Скуднов В.А. Прогрессивная технология производства инструмента // *Кузнечно-штамповочное производство*. — 1985. — № 9. — С. 21–24.

13. Выдавливание рельефных полостей в формообразующих деталях технологической оснастки: *Руководящий технический материал* 37.002.0195–81. — Горький, 1983. — 170 с.

14. Геллер Ю.А. *Инструментальные стали: Справочник*. — М.: *Металлургия*, 1984. — 584 с.

15. Гальпер Р.Р. Контактная прочность зубчатых передач с поверхностным упрочнением // *Серия Механическая обработка металлов*. — Л.: *ЛДНТП*, 1964. — Вып. 4. — 28 с.

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

17. Карелин, Е.Н. Закономерности изнашивания зубчатых передач / Е.Н. Карелин, М.Э. Никифоров, А.В. Тигин // *Успехи современного естествознания*. 2012. — № 6. — С. 75–76.

18. Рыжов, Н.М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей / Н.М. Рыжов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. — № 6. — С. 39–45.