

**ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ
ДИФФУЗИОННО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ЭКОНОМНО-
ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**
*FEATURES CONTACT WEAR DIFFUSION-HARDENED LAYERS OF
ECONOMICALLY-ALLOYED STEELS*

Е.П.Поздняков – аспирант, **И.Н.Степанкин** – к.т.н., доц.
Учреждение образования

"Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого"

Abstract. The influence of stress state on the mechanism of contact wear of structural steels 40X and 30HGSA with hardened layers. Determine the mechanism of destruction of the surface layers. Shows the differences in the nature of the surface fracture of steels 40X and 30HGSA.

Введение. Предел контактной выносливости для материалов с диффузионно-упрочненным слоем, применяемых при изготовлении зубчатых колес принято рассчитывать по зависимости:

$$\sigma_{\text{Hlim}} = 23 \text{ HRC}_3 [1] \quad (1)$$

Методика оценки предельного износа в результате повреждения питтингами более 50-ти процентов полосы контакта [2], не учитывает распределение твердости по глубине упрочненного слоя, а также его взаимодействие с сердцевиной в процессе контактного нагружения. Такой подход, закономерен при оценке ресурса работы прецизионных поверхностей зубчатых зацеплений, шариковых и роликовых подшипников, а также других аналогичных узлов. В тоже время, возможно расширение области применения карбидных и карбонитридных слоев экономно-легированных сталей, для изготовления мелкогабаритного штампового инструмента со сложной формообразующей поверхностью. Необходимость замены традиционно используемых для этой цели инструментальных сталей диктуется технологическими причинами – выдавливанием сложного профиля инструмента на предварительно отожженной заготовке. Таким способом изготавливают отделочные пуансоны для окончательного формирования крестообразного шлица винта-самореза [3].



Рис. 1 – Общий вид (а) и рабочая часть (б) отделочного пуансона для изготовления винтов-саморезов

В случае изготовления таких инструментов из высоколегированных высокоуглеродистых сталей требуется проведение одного, или более промежуточных отжигов, для восстановления заданной пластичности заготовки в процессе холодного выдавливания рабочей части. В случае невыполнения данного условия геометрия рабочей части инструмента не всегда удовлетворяет заданным требованиям чертежа. Использование экономно-легированных сталей 40X и 35XГСА с карбидными и карбонитридными слоями толщиной свыше 1,2 мм, позволяет обеспечить заданную твердость и жесткость рабочей поверхности инструмента на глубине действия максимальных эксплуатационных нагрузок в рабочем слое оснастки, и позволяет изготавливать формообразующую поверхность до упрочнения, при достаточно высокой

пластичности заготовки. Такая замена требует оценки поведения упрочненного слоя в условиях контактного изнашивания на глубину, которая превышает обычно достигаемую при описанных выше методиках [1, 2]. С целью исследования процесса контактного изнашивания на глубину соизмеримую с толщиной упрочненных слоев применена оригинальная установка [4].

Объекты и методики исследований. Объектом исследований являлись диффузионно-упрочненные слои конструкционных экономно-легированных сталей 40X и 35ХГСА. Химико-термическая обработка образцов заключалась в проведении 12-ти часовой цементации и цианирования при температуре 920°C в древесноугольном карбюризаторе. Модификацию карбюризатора осуществляли карбонатом бария BaCO_3 и карбамидом $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. В качестве окончательной термической обработки проводили закалку с температуры 860°C с последующим охлаждением в масле и низкотемпературный отпуск при температуре 200°C в течение 1 часа. Дополнительно выявляли влияние криогенной обработки в жидком азоте, которую осуществляли после закалки. Исследование микроструктуры упрочненных слоев проводили на поперечных шлифах при увеличении 100 крат на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление поверхности осуществляли 3%-х процентным спиртовым раствором азотной кислоты. Определение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор Виккерса 2Н.

Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое образцов при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [4]. Установка обеспечивает контактное нагружение без проскальзывания торцевой поверхности плоской части образца за счет его взаимодействия с рабочей поверхностью подпружиненного дискового контртела, моделируя условия работы холодновысадочного инструмента. Размеры полосы контакта определяются толщиной испытываемой поверхности образца и шириной дискового контртела. Полированные боковые поверхности рабочей части образца позволяют проводить мониторинг структурных изменений в зоне контакта и регистрацию глубины лунки износа с увеличением количества циклов нагружения.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) проведен с помощью метода конечных элементов. Компьютерная модель, представленная в виде геометрической реконструкции рабочей части образца, нагружалась давлением равномерно распределенным по поверхности контакта площадью 2 мм², отражая реальные условия испытания. Величина контактного давления принималась равной 1300 МПа, что соответствует уровню эксплуатационных нагрузок на описанные выше отделочные пуансоны и соизмеримо со значением контактного напряжения, при котором наблюдается высокая износоустойчивость высоколегированной стали Р6М5 [5]. Деформацию материала образца модели считали абсолютно упругой. Это обусловлено высокой твердостью всех рассматриваемых материалов, и обосновано в работе [6]. Модуль упругости материала образца принимали равным $2,11 \times 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0,3.

Результаты исследований и их обсуждение. После закалки и отпуска микроструктура нитроцементованных образцов стали 40X представлена мартенситом отпуска. В структуре цементованных образцов в поверхностном слое присутствует незначительное количество карбидов угловатого типа. В структуре образцов стали 35ХГСА, после науглероживания и цианирования, присутствовало незначительное количество карбидной фазы в виде ледебуритной сетки вокруг мартенситного зерна вследствие неполного ее растворения в процессе нагрева под закалку.

Анализ результатов исследований НДС рабочей части экспериментальных образцов показал, что в случае приложения к контактной поверхности напряжения 1300 МПа, в начальный момент испытаний уровень эквивалентных напряжений составляет порядка 1270 МПа. Зона максимальных напряжений находится на пересечении рабочей и боковой поверхностей образца. В центре полосы контакта напряжения снижаются до 1000 МПа (рис. 2 а). Граница между областью рабочей поверхности с приложенной

контактной нагрузкой и без неё находится под действием максимальных касательных напряжений, значения которых достигают 500 МПа (рис. 2 б). Зоны концентрации касательных напряжений расположены в глубине металла под крайними точками приложения нагрузки к поверхности образца. В этих зонах происходит зарождение и рост трещин контактной усталости (рис. 2 г).

Величина касательных напряжений ответственных за протекание микропластических деформаций под контактной поверхностью [7], при глубине лунки до 0,2 мм остается на уровне 500 МПа (рис. 3 а). При углублении лунки свыше 0,2 мм отмечается рост напряжений до 1100 МПа при глубине лунки 0,6 мм. Аналогичная закономерность отмечена для сдвиговых деформаций (рис. 3 б) 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 допуском на рабочие поверхности отделочных пуансонов, 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 (рис. 4) [8].

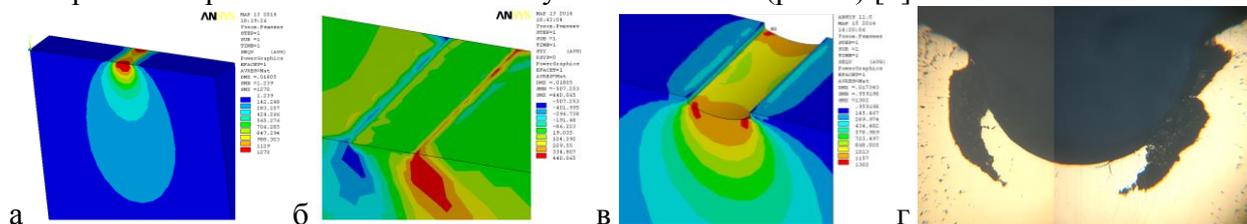


Рис. 2 – Распределение эквивалентных (а) и касательных (б) напряжений по рабочей поверхности образца в начальный момент испытаний, эквивалентных напряжений при глубине лунки 0,2 мм (в) и характер распространения трещин в образце из стали 30ХГСА с карбонитридным упрочнением (г)

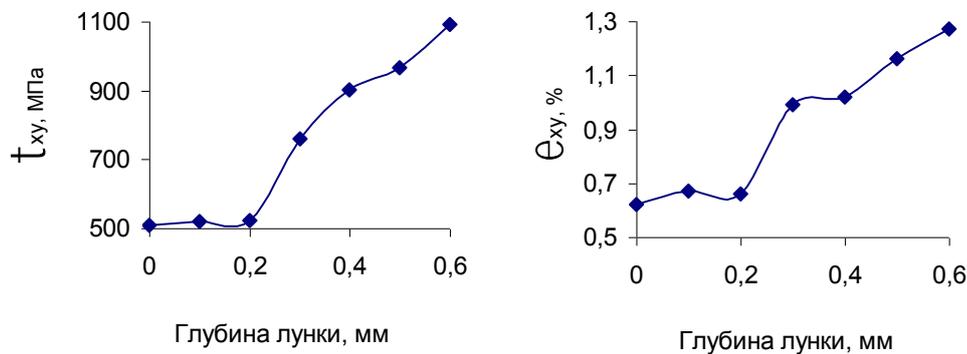


Рис. 3 – Изменение касательных напряжений (τ_{xy}) и сдвиговых деформаций (ϵ_{xy}) в боковой плоскости рабочей части в зависимости от глубины лунки

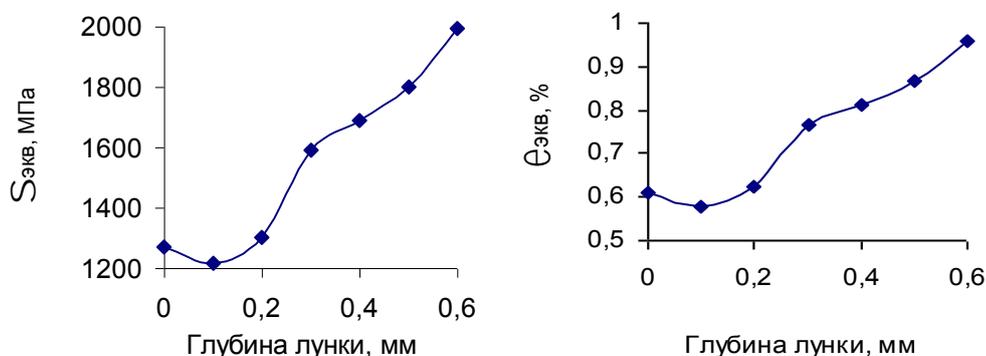


Рис. 4 – Изменение эквивалентных напряжений (σ_{eqv}) и деформаций (ϵ_{eqv}) в боковой плоскости рабочей части в зависимости от глубины лунки

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 (рис. 2 в).

Распределение микротвердости поверхностного слоя всех партий испытанных образцов описывалось схожими зависимостями. Максимальное значение составило порядка 8000 МПа, что соответствует твердости 62 HRC₃. Величина предела контактной выносливости, рассчитанная по зависимости (1) составляет 1426 МПа.

Микротвердость сердцевины образцов соответствует справочным данным для рассматриваемых сталей, составляя порядка 5500 МПа (52 HRC₃). В соответствии с зависимостью (1) предел контактной выносливости сердцевины составит 1196 МПа. Однако по ГОСТ 21354-87 зависимость (1) справедлива для материала с твердостью не менее 56 HRC₃ (6250 МПа). Не выполнение данного условия, должно обеспечить изменение механизма изнашивания образцов при достижении определенного размера лунки износа.

Анализ кривых контактного изнашивания образцов из стали 35ХГСА (рис. 5 а) показывает, что достижение глубины лунки износа 0,6 мм наблюдается в пределах 18000-26000 циклов нагружения. Максимальной контактной выносливостью обладают цементованные образцы. Применение криогенной обработки после закалки несколько увеличило интенсивность износа, который происходил в три этапа [9]. На первом отмечена приработка контактной поверхности. На втором накопление внутренних дефектов без изменения глубины лунки износа. Стабильная работа поверхности образца заканчивается после 7500-8000 циклов нагружения потерей её несущей способности. После чего начинается интенсивное изнашивание поверхности образца с образованием питтингов.

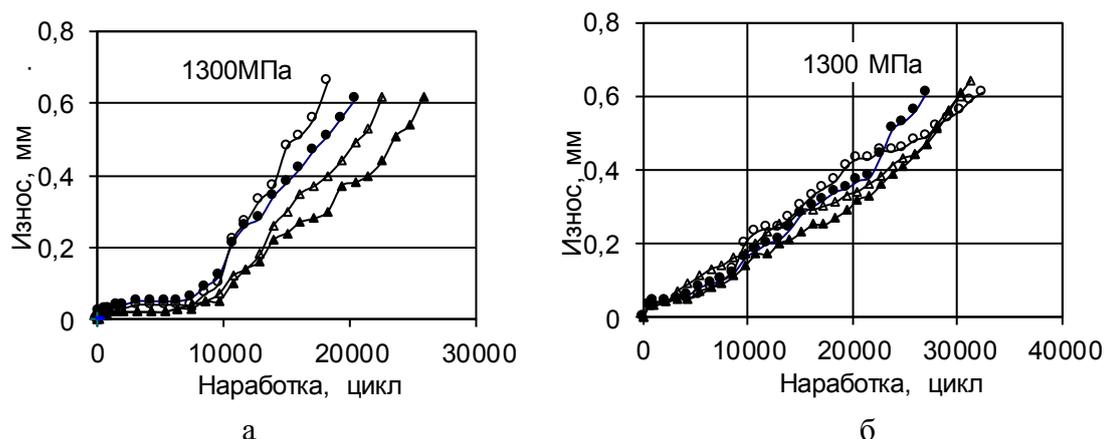


Рис. 5 – Кривые контактного изнашивания образцов из стали 30ХГСА (а) и 40Х (б) упрочненных цианированием (●○) и цементацией (▲△). Однотонные маркеры отражают износоустойчивость образцов подвергавшихся дополнительной обработке холодом

Износ поверхностных слоев стали 40Х отражается монотонно возрастающей зависимостью (рис. 5 б). Вид диффузионного насыщения практически не влияет на скорость изнашивания образцов. Рост лунки износа до глубины 0,6 мм происходит до 27000-32000 циклов испытания. До указанных значений износ всех образцов сопровождается наклепом контактной поверхности с постоянным отслоением тонких чешуек металла. Форма контактной поверхности лунки полностью повторяет профиль контртела. После превышении указанного значения из-за проявления податливости сердцевины, происходит образование крупных трещин с последующим отслоением более твердого поверхностного слоя (рис. 6), что является граничным условием для эксплуатации карбидных и карбонидных слоев для мелкогабаритного холодновысадочного инструмента. Кроме того, важным результатом исследования является способность упрочненных слоев стали 40Х изнашиваться по монотонной кривой до глубины лунки 0,6 мм независимо от увеличения концентрации эквивалентных и

касательных напряжений (рис. 2 и 3). Эта особенность может быть использована для прогнозирования равномерного износа рабочей части инструмента в процессе его эксплуатации.

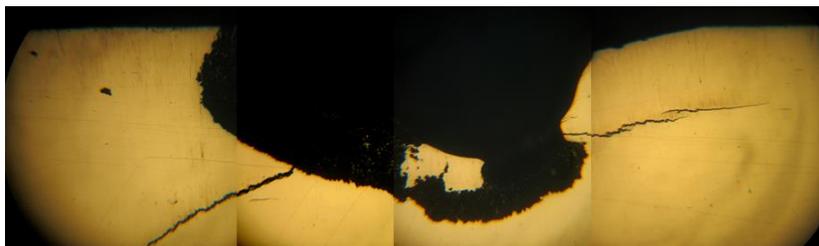


Рис. 6 - Внешний вид лунки износа упрочненного слоя стали 30ХГСА – 18280 циклов испытания ($\times 20$)

Заключение. Обоснованы подходы к испытанию экономно-легированных сталей 40Х и 35ХГСА с диффузионно-упрочненными слоями в условиях контактного изнашивания на глубину 0,2 и более мм. Получены зависимости отражающие интенсивность износа карбидных и карбонитридных слоев указанных сталей, при контактом напряжении 1300 МПа, что позволяет использовать полученные результаты для изготовления мелкоразмерного холодновысадочного инструмента со сложнопрофильной рабочей поверхностью.

Литература

1. ГОСТ 21354-87 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления
2. Р 50-54-30-87 Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость
3. Выдавливание рельефных полостей в формообразующих деталях технологической оснастки: Руководящий технический материал 37.002.0195–81.– Горький, 1983.– 170 с.
4. Патент Респ. Беларусь на полезную модель №8260. Заявка № u20110940 от 23.11.2011, МПК (11) G 01N 3/00, заявитель УО «ГГТУ им. П.О.Сухого» “Устройство испытания на контактную усталость и износ” / И.Н.Степанкин, И.А.Панкратов, В.М.Кенько, Е.П.Поздняков.
5. 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.
6. Кремнев, Л.С. Особенности разрушения инструментальных материалов / Л.С.Кремнев // Металловедение и термообработка металлов.– 1994.– № 4.– С. 17–22.
7. 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.
8. 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.
9. Карелин, Е.Н. Закономерности изнашивания зубчатых передач / Е.Н.Карелин, М.Э.Никифоров, А.В.Тигин // Успехи современного естествознания. 2012. №6. С.75-76.