

6. Картинки: поиск изображений в интернете [Электронный ресурс]. URL: <http://yandex.kz/images/search?text> (дата обращения: 01.10.2014).

7. Ультразвуковые, магнитные, вихретоковые толщиномеры, дефектоскопы. Приборы неразрушающего контроля. NDT-Club. НДТ-Клуб [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ndt-club.com/product-255-ystroistvo-krepleniya-na-trybe-remennogo-tipa-dlya-rentgen-apparatov-0-3-sbk-150-0-3-sbk-160.htm> (дата обращения: 09.10.2014).

УДК 620.178.3

*И.Н. Степанкин, канд. техн. наук, доцент, Е.П. Поздняков, аспирант*

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» (Беларусь)*

## **К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ К КОНТАКТНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

*Рассмотрено влияние напряженного состояния на механизм контактного изнашивания сталей 9ХС и 40Х. Показаны различия в характере поверхностного разрушения указанных материалов, обусловленные градиентом свойств, сформированным в результате цементации стали 40Х.*

### **Введение**

Контактное изнашивание достаточно часто вызывает отказ деталей машин [1–3]. Методы оценки ресурса контактной выносливости материалов, как правило, основаны на их испытании при контактном взаимодействии тел качения (шариков и роликов) между собой, а также с плоской поверхностью [4]. Критерием для получения количественных данных о пределе контактной выносливости материала служит площадь пятна контакта. Предельным значением повреждения обычно считается 50-процентное разрушение поверхностного слоя испытываемого образца [5]. Прекращение испытаний в

этом случае осуществляется по вполне понятным причинам – нарушение геометрии контактной поверхности, которая обеспечивает необходимые параметры работы зубчатых зацеплений и подшипников качения. Этот подход применяется также для исследования материалов, подвергнутых объемному и поверхностному упрочнению. При этом эффективная толщина упрочненного слоя не востребована в полной мере из-за жестких технических требований к прецизионному контакту.

Преждевременное прекращение испытаний ограничивает информацию о способности материала эксплуатироваться в условиях заданного периода изнашивания, который характеризует работу других деталей, например штампового инструмента. Для решения такой задачи применяется методика оценки контактного износа дискового образца [6]. Она успешно применяется для ресурсного проектирования валков прокатного оборудования с учетом возможного уменьшения их диаметра, в том числе с упрочненным поверхностным слоем. Дисковый образец, подвергаясь контактному нагружению по всей рабочей поверхности, изнашивается с образованием характерных сколов. Однако возможность учета локальной концентрации напряжений, возникающих в результате углублении питтинга, при взаимодействии изношенной поверхности инструмента с металлом заготовки отсутствует.

В представленной работе схема испытаний материалов, применяемых для изготовления штампового инструмента, усовершенствована с целью получения информации о структурных превращениях в поверхностном слое материала за счет применения образца в виде лопатки с рабочей частью, имеющей заданную толщину [7].

### **Объекты и методики исследований**

Численные исследования напряженного состояния в области локального концентратора напряжений – лунки контактного износа – осуществлены с помощью метода конечных элементов. Компьютерная модель представляет собой пространственную реконструкцию рабочей части образца в виде лопатки с цилиндрической державкой. Материал модели считали абсолютно упругим, что обосно-

вано принципами линейной механики разрушения, применимой к инструментальным материалам высокой твердости [7].

Экспериментальные исследования контактного изнашивания проводились на установке, обеспечивающей перемещение образца, закрепленного в радиальном направлении во вращающейся планшайбе [8]. Ширина дискового контртела, оттесняемого образцом в процессе кругового движения, позволяет точно рассчитать площадь поверхности контакта, а схема нагружения реализует пульсирующее нагружение по полоске. Сила, которую образец прикладывает к контртелу для его упругого смещения, регулируется пружиной. Реакция со стороны контртела приводит к возникновению на рабочей части образца контактного напряжения на площадке с размерами  $S \times B$  (рис. 1).

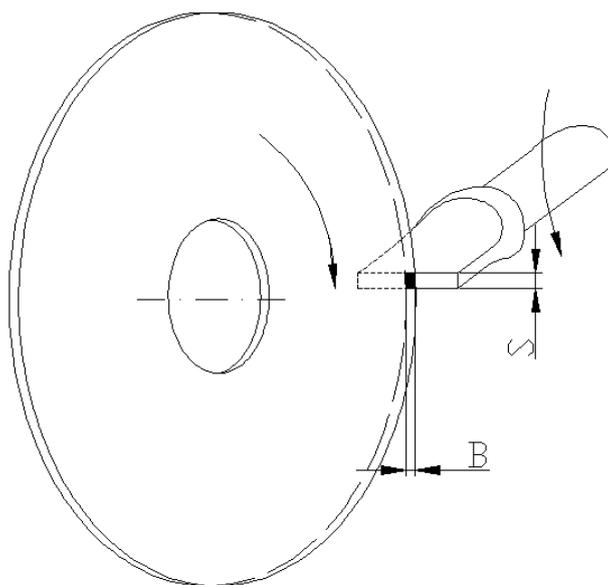
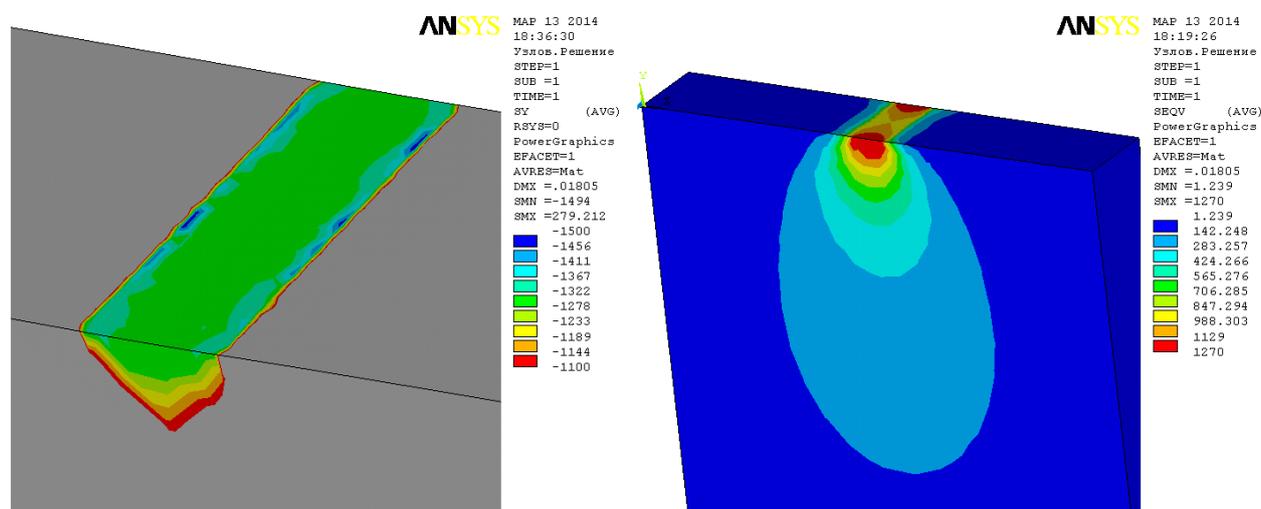


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия экспериментального образца с дисковым контртелом

В качестве испытуемого материала использовали инструментальную сталь 9ХС и конструкционную сталь 40Х с поверхностным слоем, упрочненным посредством науглероживания на глубину 1,2 мм. Науглероживание проводили в твердом карбюризаторе при температуре 920°С. Термообработка для получения окончательной твердости в обоих случаях заключалась в закалке от 860°С (масло) и низком отпуске при температуре 200°С.

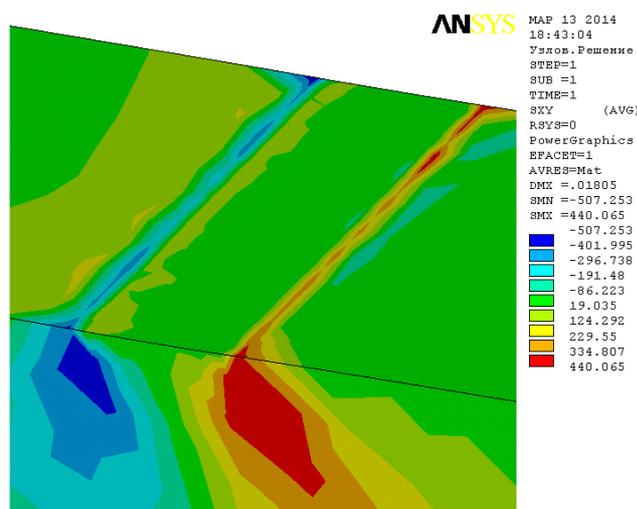
## Результаты исследований и их обсуждение

Анализ напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности образцов показал, что в очаге контактного нагружения возникает неравномерное распределение нормальных напряжений по полоске контакта (рис. 2, а). При приложении контактного напряжения 1300 МПа на продольных границах зоны контакта величина нормальных напряжений достигает значения 1500 МПа.



а)

б)



в)

Рис. 2. Распределение эквивалентных (а) и касательных (б) напряжений по рабочей поверхности образца для проведения исследований на контактное изнашивание в начальный момент испытаний

Ответственные за протекание микропластических деформаций в материале касательные и эквивалентные напряжения [9] достигают максимальных значений под рабочей поверхностью образца (рис. 2, б). Их максимальная величина составляет 1270 и 440 МПа соответственно.

Как видно из рис. 3, разрушение поверхностного слоя стали 40X начинается в зонах локализации максимальных касательных напряжений. В образцах из стали 9XC подповерхностные трещины зарождаются и растут в области градиента эквивалентных напряжений на боковой поверхности образца.

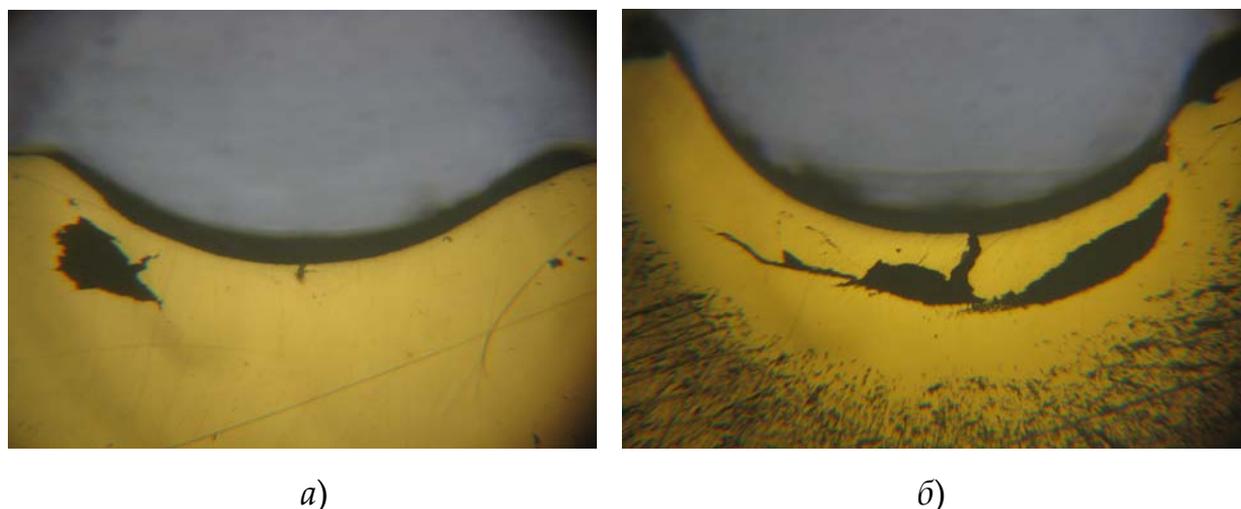
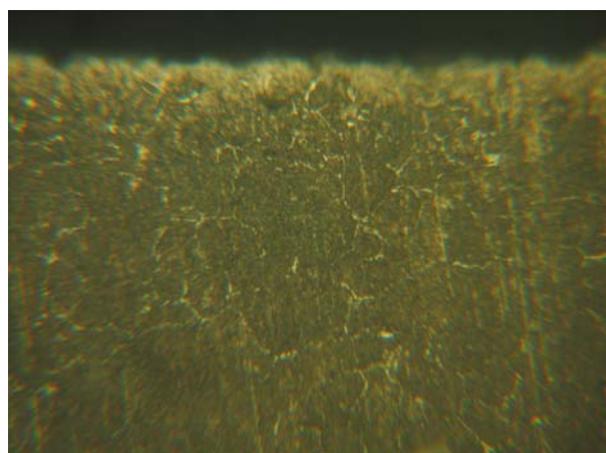
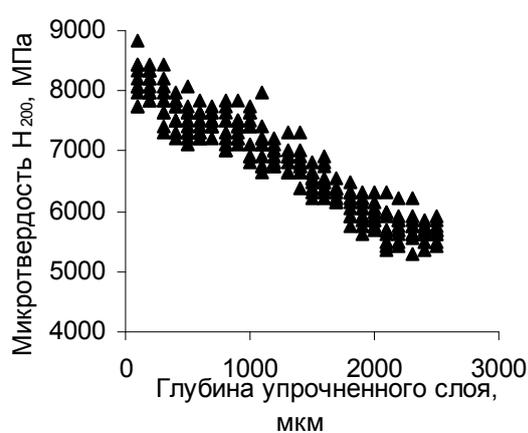


Рис. 3. Характер распространения приповерхностных трещин в образцах из стали 40X (а) и 9XC (б)

В обоих рассматриваемых случаях твердость поверхностного слоя материалов имеет высокое значение. Для стали 9XC она составляет 60 – 61 HRC, а стали 40X – 8 ГПа. Нетрадиционное использование последней в качестве материала, упрочненного цементацией, обусловлено необходимостью получения достаточно высокой твердости сердцевины, что призвано снизить вероятность пластической деформации под упрочненным слоем, а также напрямую связано с ресурсной оценкой способности материала противостоять контактному изнашиванию [10, 11].

Распределение твердости по сечению образцов из стали 40X характеризуется некоторым плато, которое наблюдается в подпо-

верхностной области на глубине 0,3–0,8 мм (рис. 4, *a*). Непосредственно у поверхности твердость имеет наиболее высокое значение, отражая ледебуритное строение наружного слоя (рис. 4, *б*). Начиная с глубины 0,8 мм, микротвердость уменьшается до 5,5–6 ГПа, характеризующих свойства сердцевины. Очевидно, что повышенная податливость материала под упрочненным слоем является причиной возникновения достаточно обширных очагов разрушения под упрочненным слоем (см. рис. 3, *a*).



*a)*

*б)* ( $\times 200$ )

Рис. 4. Микротвердость (*a*) и структура (*б*) поверхностного слоя стали 40X после химико-термической и термической обработок

Постепенное изнашивание контактной поверхности образцов приводит к перераспределению напряжений в окрестности дефекта за счет повышения концентрации напряжений в окрестности лунки износа. Величина эквивалентных и касательных напряжений возрастает более чем в 1,5 и 2 раза соответственно при достижении предельной для стали 40X глубины лунки – 0,6.

Эффект концентрации напряжений начинает сказываться при глубине лунки свыше 0,2 мм. Экспериментальные испытания образцов показали, что деформация сердцевины стали 40X в случае увеличения лунки износа свыше 0,6 мм приводит к отделению более жесткого упрочненного слоя в окрестности полоски контакта. Трещина распространяется между упрочненным слоем и сердцеви-

ной далеко за пределы очага контактного нагружения. При этом зависимость износа от количества циклов нагружения контактным напряжением 1300 МПа имеет практически линейный вид до предельной наработки порядка 30 тысяч циклов.

В то же время изнашивание стали 9ХС до наработки порядка 25 тысяч циклов сопровождается незначительным износом, при котором глубина лунки не превышает 0,1 мм. После указанного периода испытаний многочисленные повреждения, образующиеся в поверхностном слое, вызывают резкое возрастание интенсивности износа, и после испытаний в течение 30-ти тысяч циклов глубина лунки увеличивается до значений, соизмеримых с предельной глубиной лунки в образцах из стали 40Х – 0,6 мм.

### **Заключение**

Проведенные испытания показали, что механизм контактного изнашивания сталей 9ХС и 40Х обусловлен распределением свойств по сечению материала. В случае создания градиента свойств в стали 40Х за счет науглероживания её поверхности существенное влияние на механизм изнашивания оказывает повышенная податливость сердцевины металла. При контактом изнашивании стали 9ХС, которая имеет однородное распределение твердости по сечению, повреждения подповерхностного слоя распределяются более равномерно, вызывая постепенное накопление внутренних дефектов. Их суммирование в трещины контактной усталости после достижения критической наработки экспериментальных образцов приводит к резкому снижению несущей способности контактной поверхности материала и интенсифицирует его износ.

### **Список литературы**

1. Саверин М.М. Контактная прочность материала в условиях одновременного действия нормальной и касательной нагрузок. М.: 1-я тип. Машгиза в Л., 1946. 148 с.
2. Пинегин С.В. Контактная прочность в машинах. М.: Машиностроение, 1969. 243 с.

3. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Минск: Высш. шк., 1999. 374 с.

4. Р 50-54-30-87. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. М., 1988. 65 с.

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

6. Малущин Н.Н., Валуев Д.В. Испытания деталей на износостойкость и контактную прочность оборудования для металлургического производства // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №1.

7. Кремнев Л.С. Особенности разрушения инструментальных материалов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1994. № 4. С.17–22.

8. Пат. на полезную модель №82260 Республ. Беларусь, МПК (2009) G 01 N 3/00. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ / Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Кенько В.М., Панкратов И.А., Степанкина Л.В.; заявитель Гомельск. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. № u20110940; заявл. 23.11.2011; опубл. 2012. Афіцыйны бюлетэнь №3. С. 260.

9. 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.

10. ГОСТ 21354-87. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. М., 1988.

11. Р 50-54-30-87. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. М., 1988.