

УДК 620.172.2:621.785.52

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ
ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА С ДИФфуЗИОННЫМ
УПРОЧНЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ****В.М. КЕНЬКО, И.Н. СТЕПАНКИН***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение. При изготовлении инструмента, работающего в условиях высоких контактных и знакопеременных нагрузок, абразивного и контактного трения, в качестве инструментального материала широко используют быстрорежущие стали. Именно эти стали обладают заданным комплексом эксплуатационных характеристик [1]. Дополнительное повышение износостойкости и выносливости металла достигается диффузионным упрочнением поверхностного слоя [2], повышающим его твердость и обеспечивающим создание остаточных напряжений сжатия. При этом изменяется локальное напряженное состояние между макроструктурными составляющими материала – первичными эвтектоидными карбидами и металлической матрицей.

Целью работы было исследование влияния низкотемпературной нитроцементации на локальное напряженное состояние в системе карбид – металлическая матрица стали Р6М5 при знакопеременных нагрузках.

Объект исследований и методики испытаний. В качестве объекта исследований выбрана быстрорежущая сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73, упрочненная посредством низкотемпературной нитроцементации.

Распределение остаточных напряжений в диффузионно-упрочненном слое определяли путем замера стрелы прогиба пластинчатого образца после электрохимического растворения слоя металла с одной из сторон образца. Для обеспечения одинаковых условий кинетики формирования упрочненного слоя диффузионное

насыщение проводили одновременно для группы образцов, использованных для оценки характера распределения остаточных напряжений и усталостных испытаний. Толщину образцов до и после травления определяли прямым измерением с точностью $\pm 0,01$ мм. База измерения прогиба образца обеспечивалась конструкцией индикаторной планки и составляла 100 мм.

Численные исследования проводились с использованием компьютерной программы ANSYS, реализующей метод конечных элементов. Анализ напряженного состояния в окрестности карбидных включений проводили на модели, представляющей собой пластину размером 100×2000 мкм, с упрочненным слоем 500 мкм. Пластины нагружали растягивающими и сжимающими напряжениями, прикладывая их к боковым поверхностям. Нижняя сторона пластины имела жесткую заделку. Нагружение пластины осуществляли одноосным растягивающим напряжением, копирующим результирующую эпюру, возникающую при суммировании равномерно распределенного растягивающего, либо сжимающего напряжения величиной 650 МПа и поля остаточных напряжений сжатия, образующихся в карбонитридном слое.

Оценку напряженного состояния включения и его окрестности проводили с учетом остаточных напряжений, возникающих в карбонитридном слое в результате химико-термической обработки. Включения овальной формы размером 3×18 мкм располагали параллельно одной из сторон пластины, в соответствии со структурой, образующейся в стали Р6М5 при изготовлении из неё крупного инструмента методом горячего выдавливания (рис. 1, 2) [3]. В качестве граничных условий принимали глубину расположения включения и соотношение модуля упругости включения и матрицы.

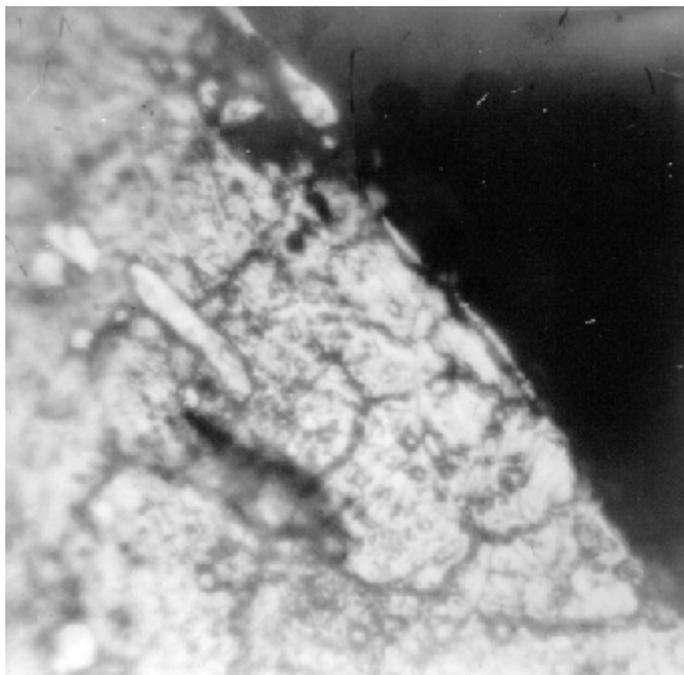


Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5, сформированная в результате горячего выдавливания рабочей полости холодновысадочных матриц ($\times 1000$)

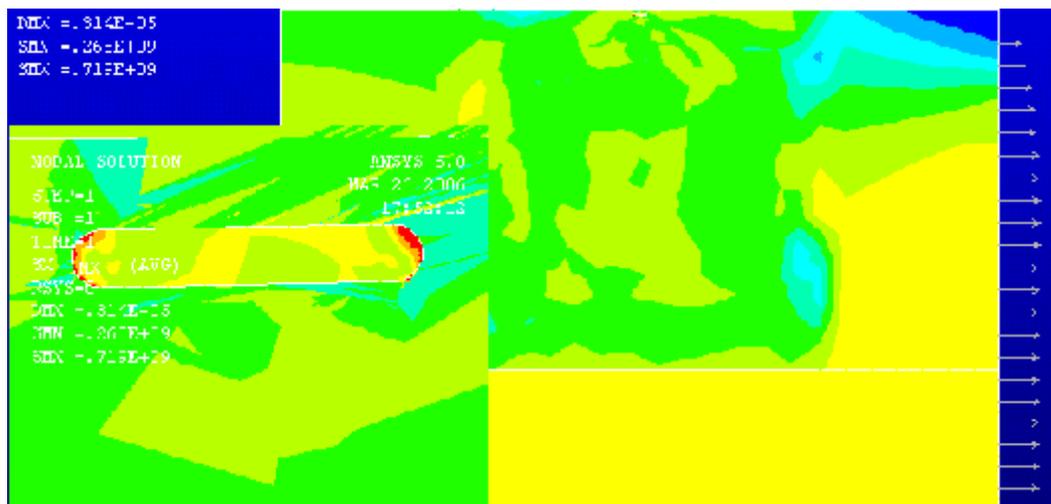


Рис. 2. Модель овального включения

Усталостные испытания проводили на установке УРС 20/600 по схеме «растяжение-сжатие» на гантелеобразных образцах, изготовленных согласно ГОСТ 25.504-82. Для каждого уровня напряжений выборка составляла 15 образцов.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты исследований показали, что величина остаточных напряжений сжатия в поверхностном карбонитридном слое достигает 330 МПа – кривая а (рис. 3).

Для оценки напряженного состояния инструментальной оснастки, работающей в условиях знакопеременных нагрузок, модель подвергали воздействию растягивающих и сжимающих напряжений. Эпюры суперпозиции напряжений, возникающих при действии внешней нагрузки, с остаточными напряжениями для фазы сжатия и растяжения материала представлены на рис. 3 кривыми б и в, соответственно. Результирующая величина растягивающих напряжений в поверхностном слое металла обусловлена характером распределения остаточных напряжений сжатия. При растяжении материала остаточные напряжения сжатия компенсируют внешнее напряжение, уменьшая его до величины 330 МПа. Сжатие материала внешним напряжением увеличивает результирующее сжимающее напряжение в поверхностном слое металла до величины 860 МПа. Таким образом, в случае приложения ко всему материалу знакопеременного напряжения, имеющего симметричный цикл с амплитудой 650 МПа (предел выносливости стали Р6М5 с упрочненным карбонитридным слоем), упрочненный слой металла подвергается воздействию знакопеременных напряжений, имеющих асимметричный цикл.

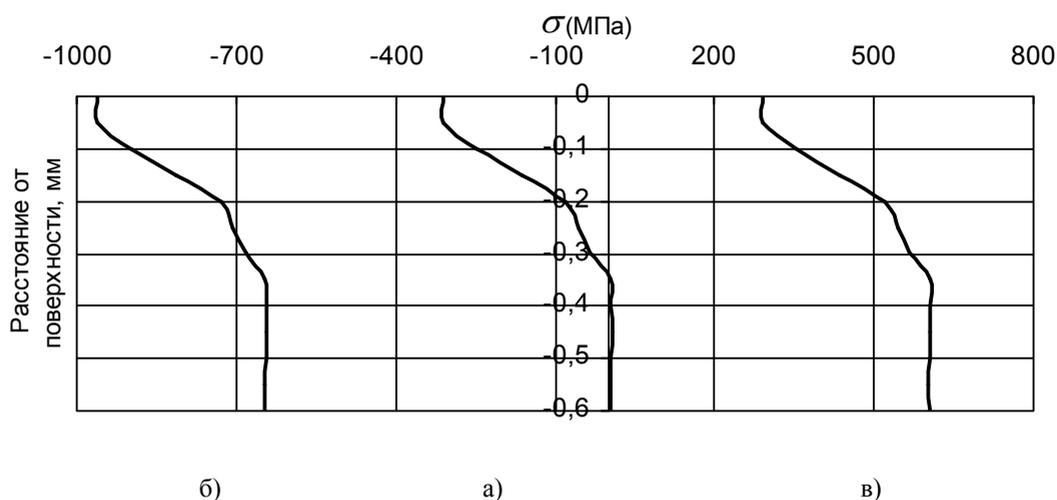


Рис. 3. Распределение напряжений (σ) по сечению образца с карбонитридным упрочненным слоем: а – без приложения нагрузки; б – при действии сжимающего напряжения 650 МПа; в – при действии растягивающего напряжения 650 МПа

Анализ напряженного состояния в окрестности карбидного включения показал, что величина напряжений, возникающих во включении и его окрестности, зависит от соотношения модуля упругости матрицы и включения, глубины его расположения. В случае расположения включения в непосредственной близости от поверхности при асимметричном цикле напряжений, возникающих в наружном слое металла, напряжения во включении и его окрестности увеличиваются с возрастанием модуля упругости частицы (рис. 4). Включение, модуль упругости которого в 2,5 раза превышает модуль упругости матрицы, в фазе сжатия испытывает сжимающие напряжения величиной 1590 МПа, а его окрестность – 1300 МПа, что в 1,85 и 1,51 раза, соответственно, выше сжимающего напряжения существующего в поверхностном слое. В фазе растяжения во включении и его окрестности возникают растягивающие напряжения величиной 544 и 452 МПа, соответственно, что также в 1,65 и 1,37 раза выше растягивающего напряжения, возникающего в поверхностном слое.

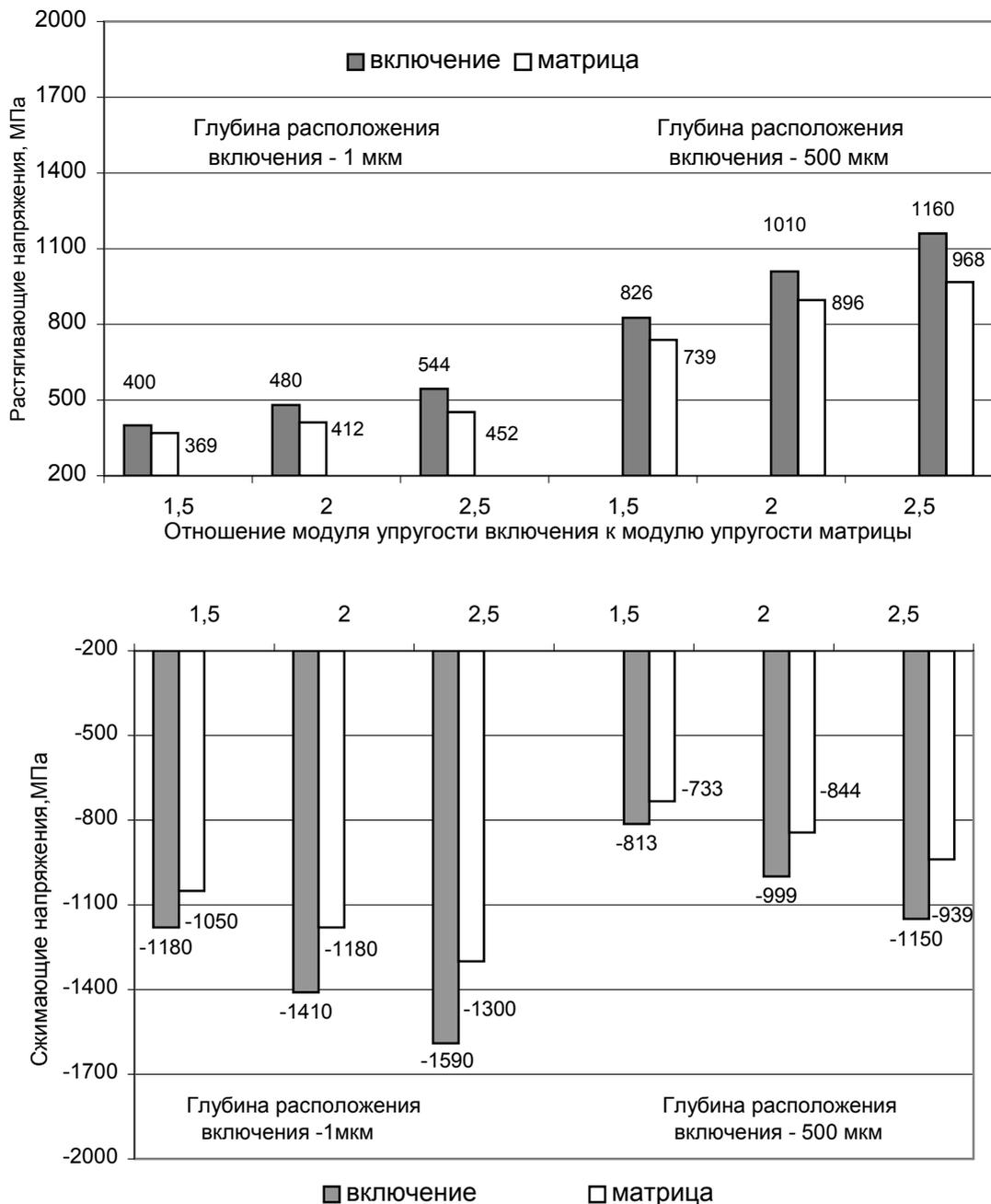


Рис. 4. Напряженное состояние включения и его окрестности

В случае расположения включения под упрочненным слоем, напряженное состояние частицы и ее окрестности характеризуется симметричным циклом (рис. 3).

На абсолютную величину напряжений оказывает влияние модуль упругости частицы, с возрастанием которого увеличиваются напряжения во включении и его окрестности, что свидетельствует о перераспределении несущей способности между включением и окружающим материалом. Зонай концентрации максимальных сжимающих и растягивающих напряжений во включении является его центральная часть, в матрице – окрестность радиуса у вершины включения (рис. 5).

Включение у поверхности

Включение под упрочненным слоем

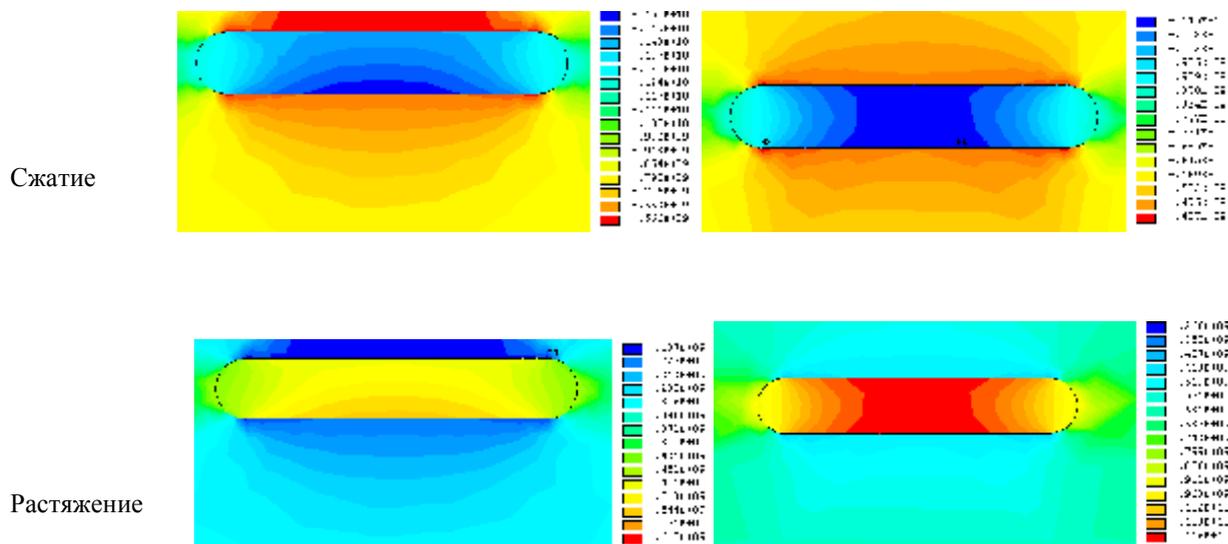


Рис. 5. Распределение напряжений (Па) в овальном включении и его окрестности при различных углублениях включения

Величина растягивающих напряжений во включении, расположенном у поверхности, значительно ниже чем в частице, расположенной под упрочненным слоем. Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено два возможных варианта развития разрушения материала с упрочненным слоем:

- разрушение краевой трещиной, зарождающейся в окрестности включения, расположенного у поверхности металла и подвергающегося воздействию высоких по величине сжимающих напряжений, в результате чего происходит отделение включения от матрицы или разрушение включения;
- разрушение металла в результате развития внутреннего дефекта, возникающего под упрочненным слоем в окрестности включения при высоких амплитудах растягивающего напряжения.

Проведенные усталостные испытания показали, что упрочнение поверхности посредством низкотемпературной нитроцементации обеспечивает повышение предела выносливости стали Р6М5, который при вероятности разрушения 95 % составил порядка 650 МПа (рис. 6), по сравнению с 570 МПа для образцов без упрочнения (рис. 7).

Анализ изломов образцов, подвергнутых испытаниям, показал, что неупрочненные образцы разрушаются краевой трещиной, при движении которой наблюдается вязкое разрушение с распространением трещины на некоторых участках под углом близким к 45° к оси образца (рис. 8а). Разрушение упрочненных образцов происходит в результате развития пластического сдвига под действием максимального касательного напряжения, возникающего при суммировании напряжений, приложенных извне, и остаточных напряжений, возникающих в материале (рис. 8б) в результате диффузионного упрочнения.

Наибольшие растягивающие напряжения концентрируются под упрочненным слоем. Их величина максимальна в окрестности карбидных частиц, где и происходит зарождение трещин. Из-за различия упругих свойств поверхностного слоя и сердцевины образца, микродеформации, возникающие в процессе циклических нагрузок в матрице и включении, отличаются по величине, что способствует распространению трещины и отделению модифицированного слоя от сердцевины (рис. 8б).

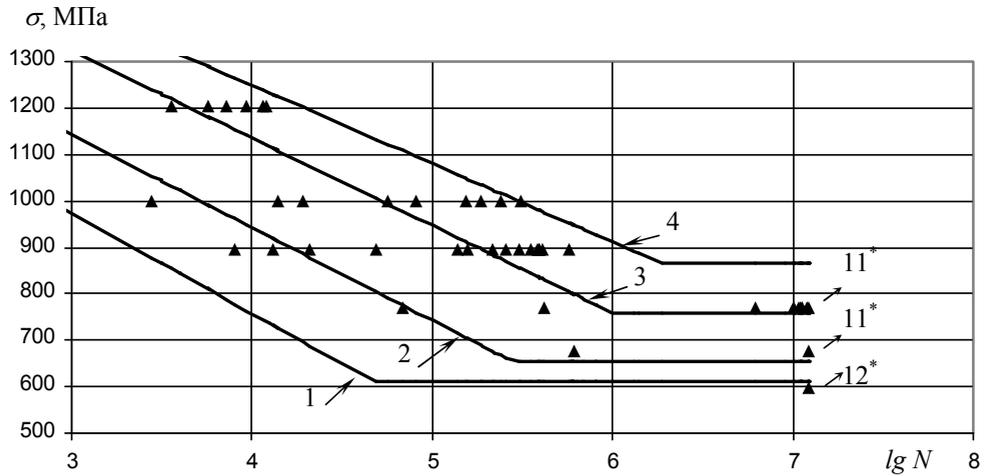


Рис. 6. Результаты усталостных испытаний образцов из быстрорежущей стали Р6М5, упрочнённых посредством низкотемпературной нитроцементации; ▲ – экспериментальные данные, отражающие максимальное напряжение цикла; – статистически обработанные кривые Велера для вероятностей разрушения: 1 – $P = 0\%$; 2 – $P = 5\%$; 3 – $P = 50\%$; 4 – $P = 95\%$; * – число выживших образцов

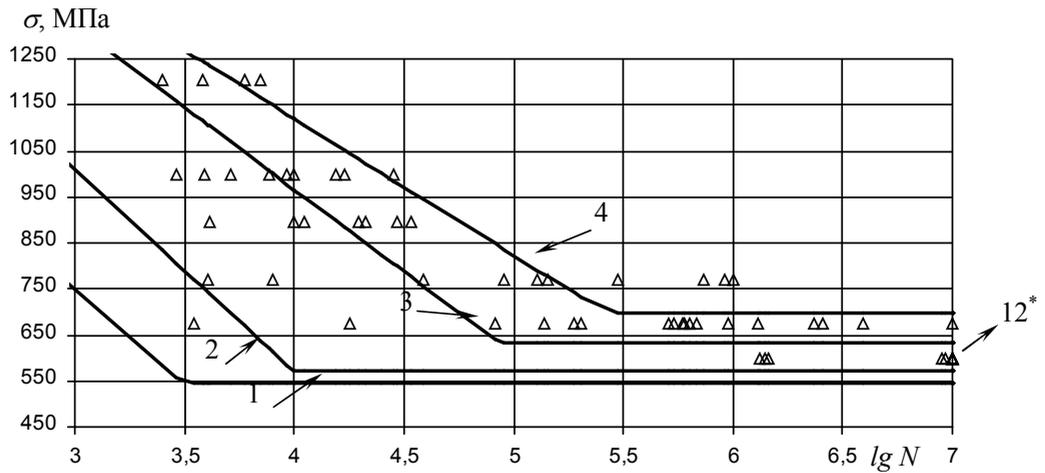
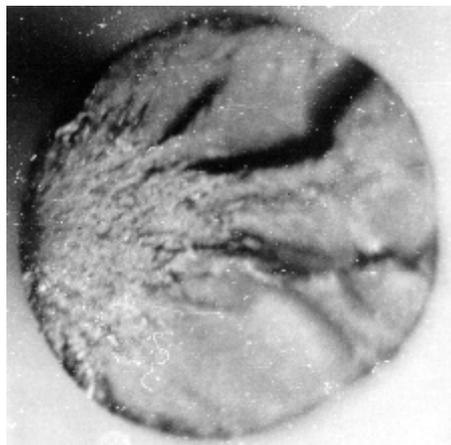
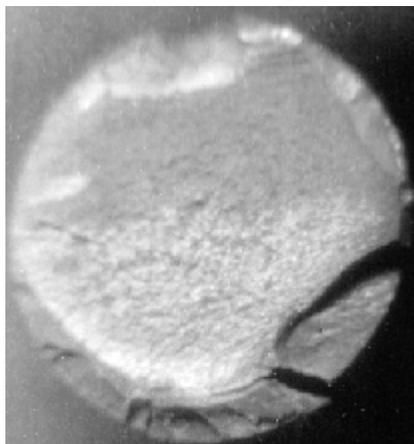


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний образцов из быстрорежущей стали Р6М5; Δ – экспериментальные данные, отражающие максимальное напряжение цикла (σ); – статистически обработанные кривые Велера для вероятностей разрушения: 1 – $P = 0\%$; 2 – $P = 5\%$; 3 – $P = 50\%$; 4 – $P = 95\%$; * – число выживших образцов



a)



б)

Рис. 8. Излом образцов после усталостных испытаний: а – без упрочнения поверхности; б – с упрочнением поверхности

Заключение. Упрочнение быстрорежущей стали Р6М5 посредством низкотемпературной нитроцементации изменяет напряженное состояние по сечению материала в условиях действия на него знакопеременных напряжений. Причиной разрушения материала является развитие дефектов, зарождающихся под упрочненным слоем в зоне возникновения максимальных растягивающих напряжений.

Список литературы

1. Кремнев Л.С. Особенности разрушения инструментальных материалов //Металловедение и термообработка металлов. – 1994. – № 4. – С. 17-22.
2. Сарело С.Б., Кенько В.М., Степанкин И.Н. К вопросу повышения стойкости холодновысадочной оснастки //Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2003. – Т. 2, № 2 (26). – С. 157-161.
3. Кенько В.М., Пинчук В.В., Степанкин И.Н. Оптимизация технологии изготовления холодновысадочных матриц //Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 11. – С. 22-24.

Получено 23.06.2004 г.