

УДК 672.88.05

И. Н. СТЕПАНКИН, канд. техн. наук; Е. П. ПОЗДНЯКОВ, аспирант (Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Беларусь)  
E-mail: hanter3@tut.by

## К вопросу изготовления мелкогабаритного штампового инструмента из экономнолегированных сталей с диффузионным упрочнением поверхностного слоя

*В работе представлены результаты использования экономнолегированной стали 35ХГСА с диффузионно-упрочненным слоем для изготовления отделочных пуансонов, формирующих крестообразный шлиц в головках винтов-саморезов. Показана возможность замены материала-прототипа — инструментальной стали Х12М по критериям технологической пластичности и контактного изнашивания в упрочненном состоянии. Проведены испытания на сжатие и на контактное изнашивание. Помимо этого дана оценка напряженно-деформированного состояния поверхностей отделочных пуансонов с помощью численного анализа, реализуемого методом конечных элементов, исследуется микроструктура, а также определяется микротвердость образцов.*

*Сравнительный анализ интенсивности контактного изнашивания инструментальной стали Х12М и экономнолегированной стали 35ХГСА, упрочненной цементацией, показывает, что в пределах 10 тыс. циклов нагружений данные материалы имеют соизмеримые показатели к износу. Иными словами сталь 35ХГСА с упрочненным слоем позволяет увеличить стойкость пуансонов более чем в 3 раза. Технологическая пластичность стали 35ХГСА на операции холодного формования рабочей части инструмента идентична стали Х12М, что позволяет произвести замену материала. А последующая апробация применения стали 35ХГСА для изготовления мелкогабаритного инструмента показывает снижение издержек на изготовление оснастки.*

*The paper presents the results of the use of sparingly alloyed steel 35X1CA with diffusion-hardened layer for the manufacture of finishing punches, forming the cross-slot in the screw heads of the screws. Possibility of replacement of material-prototype (tool steel X12M) on the criteria of technological plasticity and contact wear in the hardened state is shown. Conducted compression testing and contact wear. In addition, the estimation of stress-strain state of surface finishing punches using the numerical analysis of the finite element method is given, the microstructure and the microhardness of the samples are studied.*

*Comparative analysis of the intensity of the contact wear of the tool steel X12M and economically alloyed steel 35X1CA, hardened by cementation, shows that in the range of 10 thousand cycles of loading these materials have comparable figures to wear. In other words steel 35X1CA with a hardened layer allows to increase the resistance of the punches more than 3 times. Ductility of steel 35X1CA on the cold shaping operation of the working parts of the tool are identical to become X12M that allows you to replace the material. Subsequent testing of the use of steel 35X1CA for manufacturing small tool shows the reduction in the costs of production tooling.*

**Ключевые слова:** сталь; диффузионное упрочнение; технологическая пластичность; контактное изнашивание.

**Keywords:** steel; diffusion hardening; ductility; contact wear.

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке задания 4.1.07 ГПНИ «Материалы в технике».*

---

Работоспособность оснастки для холодной объемной штамповки во многом зависит от структуры и свойств поверхностного слоя металла. Эта закономерность достаточно сильно проявляется при изготовлении рабочей поверхности инструмента холодным выдавливанием. Предварительная подготовка металла, проводимая с помощью термоциклического отжига, направлена на формирование в заготовке структуры зернистого перлита [1]. Его высокая пластичность является необходимым условием для получения качественной геометрии гравюры. Кроме этого снижается вероятность образования внутрикристаллических дефектов при неравномерной деформации инструментального сплава в случае получения сложнопрофильных поверхностей штампов.

Высоколегированные полутеплостойкие штамповые стали типа X12M, широко применяемые при изготовлении холодноштамповочного инструмента, проявляют высокую чувствительность к структурным изменениям в процессе выдавливания гравюры инструмента. Это связано с присутствием в их составе карбидной фазы, объем которой может достигать 12 % и более [2]. Совместная деформация включений и перлитной матрицы

зачастую приводит к появлению микротрещин, которые достигают своих критических размеров, как на стадии окончательной термической обработки, так и при эксплуатации инструмента. Изготовление из высоколегированных сталей инструмента, рабочая поверхность которого достаточно сложна, требует нескольких переходов выдавливания рабочей части с проведением промежуточных отжигов. Подобная технология используется при формировании рабочей части отделочных пуансонов для изготовления крестообразных и прямолинейных шлицев на шурупах различных типоразмеров. Замена высоколегированной стали на альтернативный сплав с диффузионным упрочнением поверхностного слоя, которая может быть проведена по критериям контактного изнашивания, позволяет существенно улучшить технологическую составляющую инструментального производства инструмента, а также повлиять на стойкость штампа.

#### **Объекты и методики исследований**

Объектом исследования являются отделочные пуансоны, применяемые в холодновысодочных автоматах для изготовления крестообразных шлицев в головках шурупов (см. рис. 1).

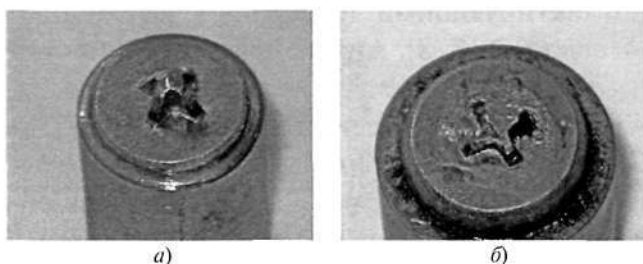


Рис. 1. Общий вид нового (а) и изношенного (б) отделочных пуансонов для изготовления крестообразных шлицев в головках шурупов

Пуансоны прототипы изготавливаются из стали X12M с твердостью рабочей поверхности 63...64 HRC. В качестве альтернативного материала используется экономнолегированная сталь 35ХГСА. Для достижения необходимой твердости рабочую поверхность подвергают цементации в среде древесного угля, модифицированного  $\text{BaCO}_3$ . Длительность цементации составляет 12 часов при температуре 920 °С. Материал поковок, из которых изготавливаются шурупы с крестообразным шлицем, — сталь 20.

Для сравнения свойств применяемых для изготовления инструмента материалов их подвергают испытаниям на сжатие по ГОСТу 25.503—97 и на контактное изнашивание. Осадку проводят на испытательной машине ИП-1250М при скорости деформации 0,8 кН/с. С целью повышения технологической пластичности материалов в холодном состоянии образцы подвергают отжигу в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [1]. При испытании на контактное изнашивание выстраиваются кривые износа в зависимости от количества циклов нагружения поверхности экспериментальных образцов. Интенсивность накопления повреждений в поверхностном слое образцов исследуется на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3]. 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 толщи-

ной 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.

Оценку напряженно-деформированного состояния поверхностей отделочных пуансонов проводят с помощью численного анализа, реализуемого методом конечных элементов. В этом случае материал инструмента (отделочные пуансоны) считается абсолютно упругим телом, что соответствует принятым подходам к разрушению инструментальных материалов высокой твердости [4]. Свойства материала заготовки из стали 20 изменяются в соответствии с упругопластической закономерностью, определенной в процессе осадки экспериментального образца.

Исследование микроструктуры проводят с применением оптического микроскопа Метам РВ-22. Определение микротвердости происходит на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор Виккерса 2 Н.

### Результаты исследований и их обсуждение

Предел контактной выносливости для материалов с диффузионно-упрочненным слоем, применяемых при изготовлении деталей машин, принято рассчитывать по зависимости [5]:

$$\sigma_{Hlim} = 23 HRC_{\text{Э}} \quad (1)$$

Методика оценки предельного износа в результате повреждения питтингами более 50 % полосы контакта [6] не учитывает распределение твердости по глубине упрочненного слоя, а также его взаимодействие с сердцевинной 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 то же время, расширение области применения карбидных и карбонитридных слоев экономнолегированных сталей для

изготовления мелкоразмерного штампового инструмента со сложной формообразующей поверхностью требует выявления способности упрочненной поверхности сопротивляться многократному контактному нагружению, в том числе с учетом износа поверхностного слоя металла в пределах допуска на изготавливаемую поковку.

Исследования напряженно-деформированного состояния отделочных пуансонов показывают, что величина максимальных эквивалентных напряжений на рабочей поверхности инструмента составляет 1200...1700 МПа (см. рис. 2, а, 2-я полоса обложки). Зона концентрации эквивалентных напряжений является острая кромка выступающей части инструмента, формирующая внутреннюю полость в заготовке. Максимальная величина касательных напряжений достигает порядка 390 МПа (см. рис. 2, б, 2-я полоса обложки). Это составляет порядка 30 % от максимальных эквивалентных напряжений на поверхности инструмента. Подобное соотношение является характерным для тех случаев, когда трещины контактной усталости зарождаются в глубине материала, на некотором расстоянии от внешней поверхности, подвергаемой воздействию пульсирующего напряжения. Как правило, расстояние, на котором происходит зарождение внутренних усталостных дефектов, составляет не более 0,5 мм, при условии, что коэффициент трения между

контактирующими поверхностями не превышает 0,2 [7, 8]. Анализ визуализации численного расчета показывает, что непосредственно на поверхности отделочного пуансона величина касательных напряжений не превышает 280 МПа (см. рис. 2, б, 2-я полоса обложки), а их локальный очаг расположен в подповерхностном слое (см. рис. 2, в, 2-я полоса обложки). Соотношение этого значения с максимальным касательным напряжением и величиной эквивалентных напряжений удовлетворяет закономерностям, приведенным в работе [8], из которых следует, что величина коэффициента трения на рабочей поверхности пуансона составляет менее 0,2. Применение технологической смазки способствует реализации указанного граничного условия. Очевидно, что отказ инструмента в таком случае происходит не по причине изнашивания его рабочей части, а в результате распространения трещин контактной усталости. Данный вывод находит свое подтверждение и на рис. 1, б.

Применение для изготовления пуансонов штамповой стали X12M с твердостью 63...64 HRC согласно зависимости (1) обеспечивает достижение предела контактной выносливости материала на уровне 1449...1512 МПа. Экспериментальные исследования показывают, что при контактном напряжении 1280 МПа износ поверхностного слоя экспериментальных образцов после наработки более 30 тыс. циклов составляет не более 0,07 мм (см. рис. 3). В очаге действия контактного напряжения происходят незначительные структурные изменения, заключающиеся в измельчении карбидной фазы и нарушении ее строчечного расположения (см. рис. 4, а). При этом в подповерхностном слое в результате действия высоких касательных напряжений, а также различия в упругих характеристиках металлической матрицы и карбидных включений, наблюдается разрушение карбидных включений (см. рис. 4, б).

Анализ кривой износа стали 35ХГСА, упрочненной посредством цементации, показывает, что до 10 тыс. циклов нагружения при контактном напряжении 1300 МПа стойкость

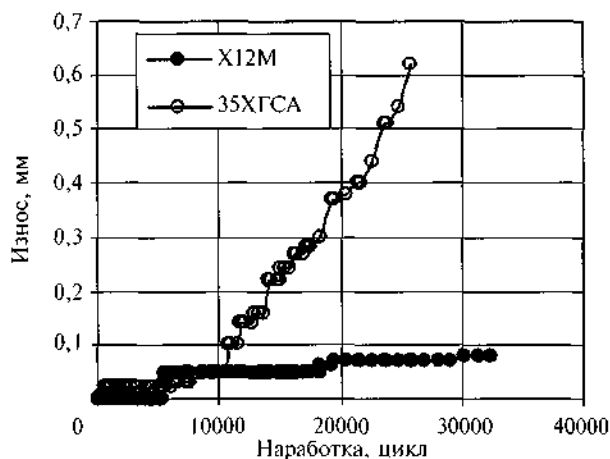


Рис. 3. Кривые износа сталей X12M и 35ХГСА, полученные при действии контактных напряжений 1280 и 1300 МПа соответственно

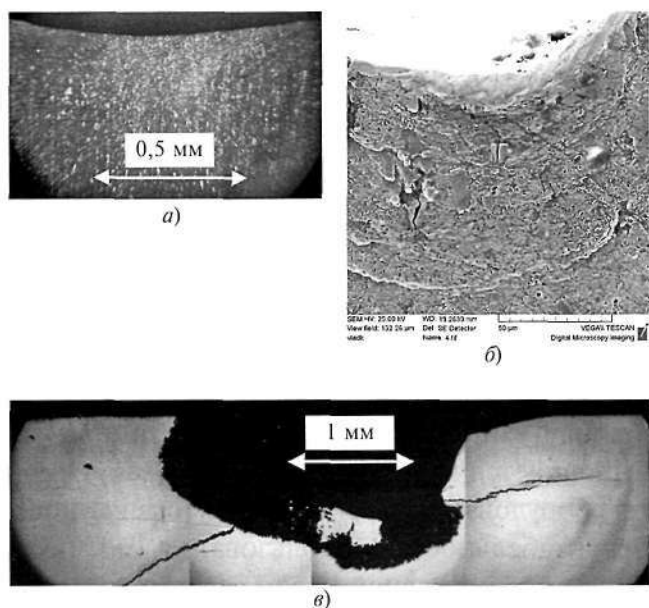


Рис. 4. Структура поверхностного слоя (а), разрушение карбидных частиц (б) стали X12M после 9720 циклов нагружения напряжением 1280 МПа и внешний вид лунки износа на образцах из стали 35ХГСА после 18280 циклов испытания (в)

к изнашиванию науглероженного слоя аналогична стали X12M. После указанного периода поверхностный слой подвергается разрушению за счет деформации сердцевины образца (см. рис. 4, в). Полученные результаты позволяют использовать сталь 35ХГСА для изготовления отделочных пуансонов при условии цементации поверхностного слоя инструмента.

Распределение твердости по сечению образцов из стали 35ХГСА показывает, что науглероживание с последующей закалкой позволяет сформировать слой с повышенной твердостью на глубину не менее 1,5 мм. Наружный слой толщиной порядка 0,2...0,3 мм имеет выраженную заэвтектоидную структуру (см. рис. 5). При этом закалка, проведенная с температуры 860 °С, приводит к устранению сплошной цементитной сетки, что является одним из факторов, благоприятно влияющих на ударную вязкость инструмента.

Технологическая пластичность рассматриваемых материалов является вторым аспектом, который учтен при анализе возможностей замены материала инструмента. Важными особенностями для холодного выдавливания

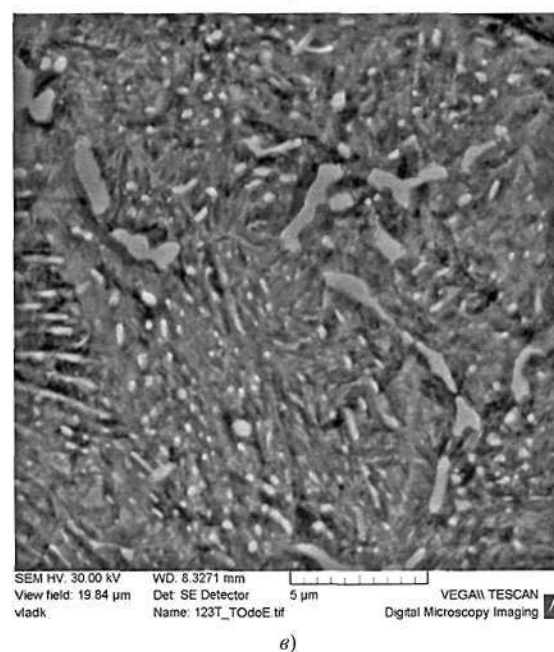
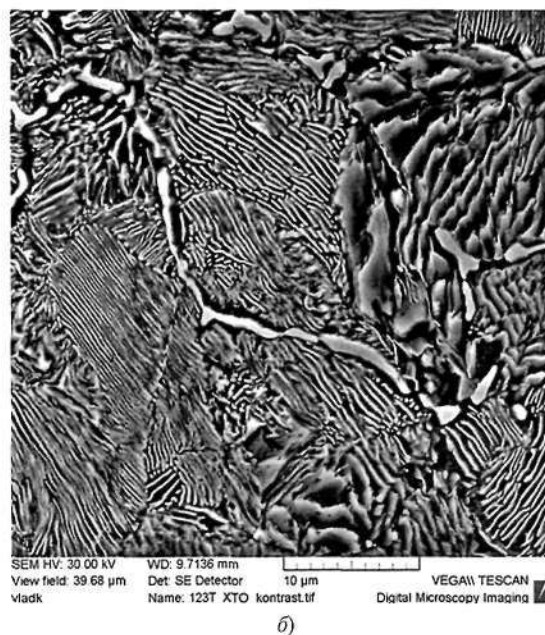
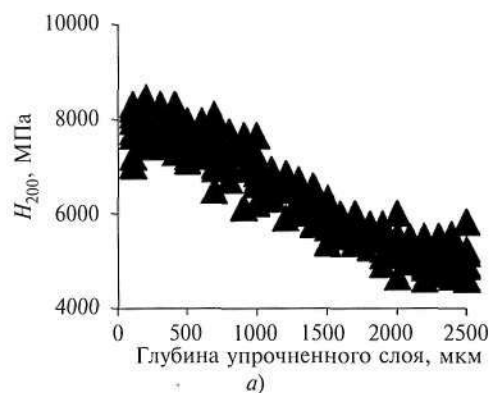
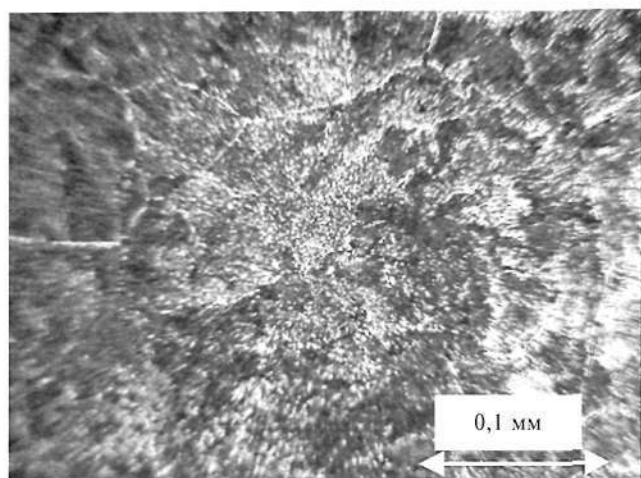
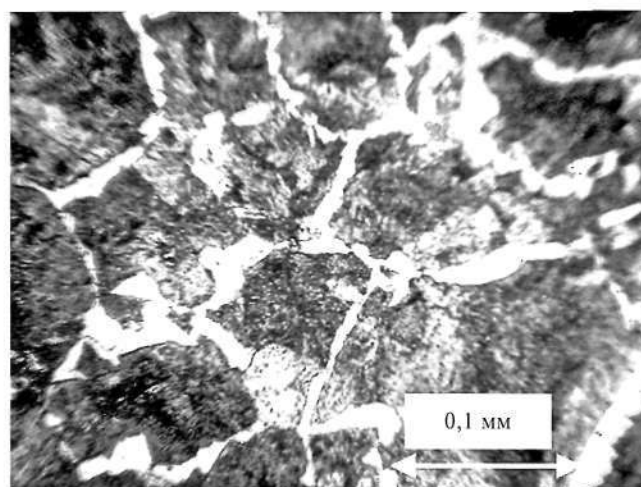


Рис. 5. Распределение микротвердости  $H_{200}$  (а), а также структура карбидного слоя стали 35ХГСА до окончательной термообработки (б) и после нее (в)

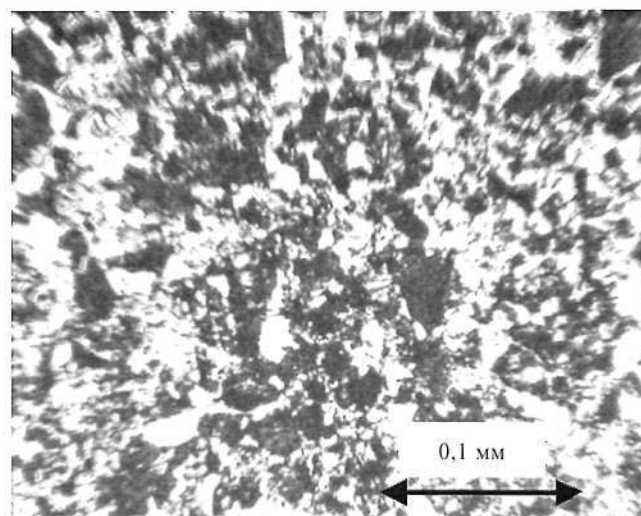




а)



б)



в)

**Рис. 6. Структура сталей, применяемых для изготовления отделочных пуансонов:**

а — X12M после термоциклического отжига, б — 35ХГСА в состоянии поставки после нормализации, в — 35ХГСА после полного отжига

гравюры штампового инструмента являются требования к проведению предварительной термообработки. Согласно рекомендациям, изложенным в [1] для формообразования инструмента из стали X12M, заготовки необходимо подвергать термоциклическому отжигу длительностью не менее 56 часов. В результате металлическая матрица сплава приобретает структуру зернистого перлита (см. рис. 6, а). Особое внимание при отжиге уделяется защите поверхности заготовок от окисления. Технологически это требование легко выполняется в случае применения вакуумного оборудования. При его отсутствии, либо нерентабельности использования по причине незначительной массы садки мелких заготовок, возникает необходимость механической доработки заготовки для удаления обезуглероженного слоя, что приводит к дополнительным материальным затратам и увеличению трудоемкости технологического процесса. Твердость металла после циклического отжига должна находиться в пределах 207...217 *НВ*, что обеспечивает наилучшее сочетание структуры и пластичности сплава в холодном состоянии. Аналогичные значения твердости характерны для стали 35ХГСА в состоянии поставки (горячекатаный нормализованный прокат). Однако структура сплава при этом отличается достаточно крупнозернистым ферритно-перлитным строением (см. рис. 6, б). Однако, полный отжиг заготовок в течение 4...6 часов позволяет существенно измельчить структуру сплава (см. рис. 6, в) и снизить начальную твердость заготовок до значений менее 167 *НВ*.

Оценка технологической пластичности, проведенная на заготовках из рассматриваемых сталей, показывает, что на кривых напряжение — деформация (см. рис. 7, а, б) для обоих сплавов наблюдается площадка текучести в районе 240 МПа. Деформация заготовок, подвергнутых отжигу, в диапазоне 20—30 % протекает без прироста внешнего напряжения. Кривая деформации заготовок из стали 35ХГСА (см. рис. 7, б) не имеет выраженного участка, отражающего текучесть металла.

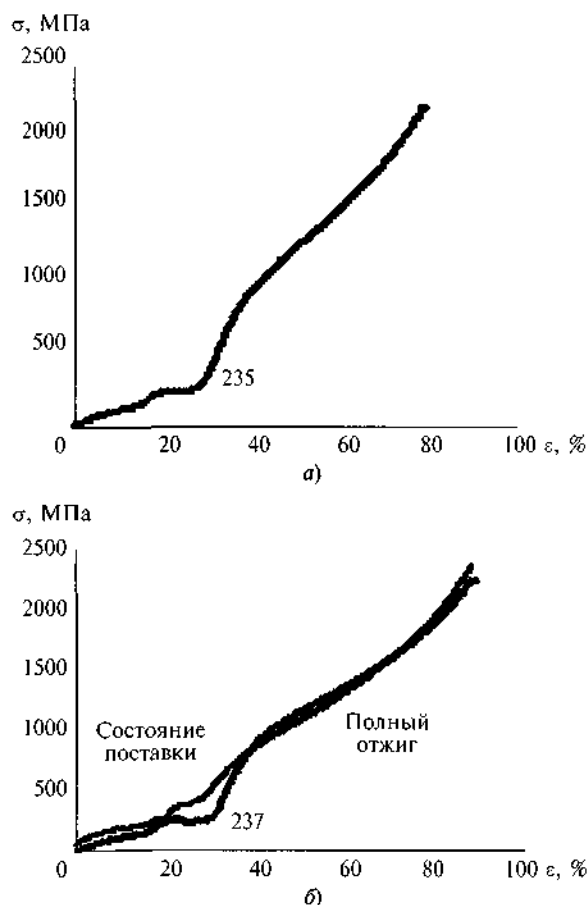


Рис. 7. Диаграммы технологической пластичности сталей X12M (а) и 35XГСА (б), полученные при осадке призматических образцов в холодном состоянии:

$\sigma$  — сжимающее напряжение,  $\epsilon$  — продольная деформация

Полученные результаты позволяют спрогнозировать возможность замены инструментальной стали X12M экономнолегированной сталью 35XГСА. На стадии выдавливания рабочей части заготовки сопоставимые значения пластичности сплавов в холодном состоянии обеспечивают получение точной геометрии формообразующей поверхности инструмента. Производственная апробация в условиях ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» показывает, что для изготовления детали «пуансон отделочный» из стали X12M геометрия рабочей части инструмента формируется холодным выдавливанием за два перехода. Между операциями выдавливания проводится циклический отжиг в защитной атмосфере для восстановления пластичности сплава и предупреждения образования мик-

ротрещин в окрестности карбидных включений, выходящих на рабочую поверхность инструмента. Длительность операции отжига составляет не менее 50 часов. При изготовлении инструмента из стали 35XГСА достаточно одного перехода для полного формообразования рабочей части инструмента. Оценка наработки на отказ показывает, что, несмотря на высокую стойкость стали X12M к контактному изнашиванию, определяемую на экспериментальных лабораторных образцах, стойкость инструмента имеет достаточно низкий показатель (порядка 3 тыс. поковок). Отказ инструмента происходит по причине возникновения приповерхностных трещин в окрестности крупных карбидных включений. Замена материала на сталь 35XГСА с упрочненным слоем позволяет увеличить стойкость пуансонов отделочных №№ 171.1461.0003/53, 171.1469.7008/052, 171.1460.4016/064 более чем в 3 раза, до 10 тыс. поковок одним инструментом.

**Выводы.** 1. На основе сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований проведена замена материала для изготовления мелкогабаритного штампового инструмента — отделочных пуансонов для формирования крестообразных шлицев на головках шурупов-саморезов.

2. Показано, что в процессе работы оснастки на ее рабочей поверхности возникают эквивалентные напряжения максимальной величиной 1200...1700 МПа. Максимальные по величине касательные напряжения порядка 400 МПа возникают в подповерхностном слое, что приводит к разрушению материала инструмента по механизму контактной усталости.

3. Сравнительный анализ интенсивности контактного изнашивания материала прототипа — инструментальной стали X12M и экономнолегированной стали 35XГСА, упрочненной цементацией, при пульсирующем воздействии контактного напряжения 1300 МПа показывает, что в пределах 10 тыс. циклов нагружений данные материалы имеют соизмеримую стойкость к износу.

4. Технологическая пластичность стали 35ХГСА на операции холодного формообразования рабочей части инструмента идентична стали Х12М, что позволяет произвести замену материала.

5. Производственная апробация показывает возможность применения стали 35ХГСА для изготовления мелкоразмерного инструмента и позволяет снизить издержки на изготовление оснастки, а также повысить ее стойкость.

### Список литературы

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

2. *Инструментальные* стали и их термическая обработка. Справочник / И. Артингер — М.: Металлургия. 1982. 312 с.

3. *Пат.* 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.

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

5. *ГОСТ 21354-87.* Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления.

6. *P 50-54-30-87.* Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость.

7. *Рыжов Н. М.* Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2010. № 7. С. 39—45.

8. *Beheshti A., Khonsari M. M.* On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect // *Tribology International.* 2011. V. 44. Pp. 1620—1628.