

УДК 669.15

И.Н. СТЕПАНКИН, канд. техн. наук

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Республика Беларусь

Д.В. КУИС, канд. техн. наук

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

Е.П. ПОЗДНЯКОВ

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Республика Беларусь

А.Б. НАЙЗАБЕКОВ, д-р техн. наук; С.Н. ЛЕЖНЕВ, канд. техн. наук

Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан

## К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

*В работе исследовано влияние карбидной ликвации на локальную прочность сталей ледебуритного класса Р6М5 и Х12М. Выявлены особенности взаимодействия крупных карбидных включений и твердого раствора сплавов при разрушении композиционного материала, в котором строчки включений располагались вдоль и поперек линии действия растягивающего усилия, а также под углом 45° к нему. Показано, что при изготовлении крупных матриц со сложной формообразующей поверхностью произвольная ориентация карбидов ограничивает стойкость инструмента при изготовлении его рабочей поверхности методами электроэрозионной обработки. Применение трехкратного перекова в качестве предварительной операции обработки заготовки существенно повышает эксплуатационные характеристики материала за счет снижения влияния карбидной ликвации.*

**Ключевые слова:** инструментальная сталь, карбидная ликвация, трехкратный переков, штамповая оснастка

**Введение.** Распределение карбидной ликвации в заготовке легированной стали зависит от уровня легирования сплава, размеров заготовки и степени проработки ее структуры в процессе металлургического передела слитка. В подавляющем большинстве случаев машиностроительному и инструментальному производству приходится иметь дело с заготовкой, макроструктура которой сформирована в процессе прокатки. После нее, как правило, наблюдается характерная строчечная ликвация карбидной фазы, сопровождающаяся анизотропией свойств, как заготовки, так и будущей детали. Отмеченный эффект достаточно сильно проявляется при изготовлении тяжело нагруженного штампового и другого инструмента из инструментальных сталей ледебуритного класса.

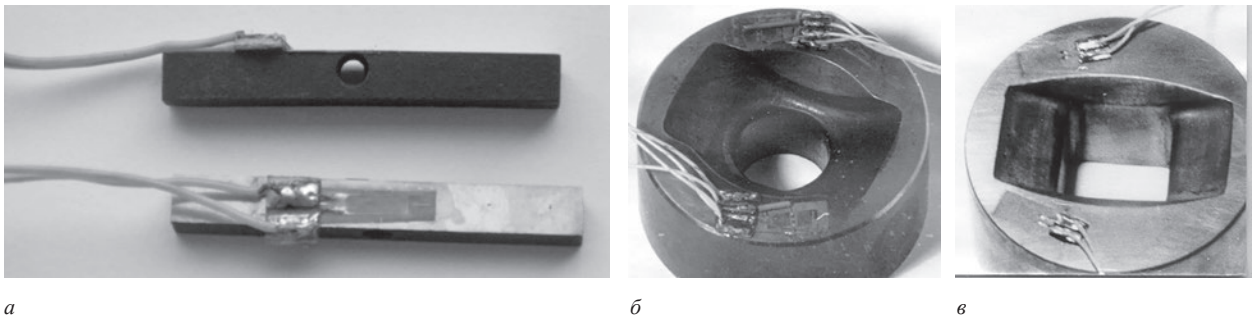
Одним из способов снижения анизотропии высоколегированных сталей и повышения локальной прочности металла является переков заготовок, который увеличивает трудоемкость изготовления конкретного изделия, но повышает механические свойства материала. Целесообразность применения предварительной термомеханической обработки является предметом постоянной дискуссии. Подобное положение дел связано с неоднозначным результатом перекова в отношении высоколегированных инструментальных сталей, содержащих хром, вольфрам и другие элементы, способные к интенсивному выгоранию в процессе обработки. Дополнительным негативным фактором является достаточно высокая трудоемкость операцииковки, продуктивность которой во многом зависит от мастерства кузнеца. Отмеченные недостатки зачастую являются обоснованием отказа от проведения перекова в пользу использования сталей с выраженной текстурной морфологией. Подобный подход является перспективным в части применения возможных вариантов поверхностного упрочнения сплава с формированием на его наружной поверхности

зоны модифицированного слоя. Однако позитивное влияние модификации ограничивается лишь толщиной сформированного слоя, что далеко не всегда удовлетворяет требованиям масштабного фактора в части напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности детали. Этот аспект наиболее актуален для деталей, рабочая поверхность которых испытывает воздействие пульсирующих контактных напряжений. В таких условиях трещины контактной усталости будут зарождаться в подслое (под упрочненным слоем), а наличие включений будет провоцировать их формирование [1–3]. Это делает актуальным исследование, направленные на изучение взаимосвязи текстуры металла с его механизмом разрушения и свойствами, а также оценки значимости процесса трех-пятикратного перекова на возможность повышения эксплуатационных характеристик материала, особенно в части способности его сопротивления зарождению и распространению трещин.

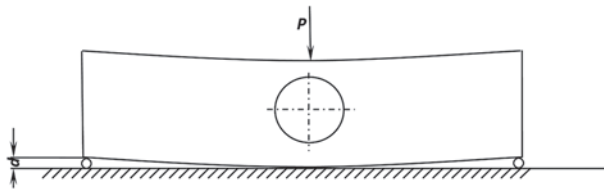
**Объекты и методики исследований.** Объектами исследований являлись стали ледебуритного класса — быстрорежущая Р6М5 и полутеплостойкая штамповая Х12М. Для выявления влияния структурных особенностей на характеристики указанных сплавов проводили испытания лабораторных образцов и холодновысадочных матриц (рисунок 1).

Призматические образцы вырезали из заготовки диаметром 70 мм. Карбидная неоднородность металла соответствовала 4–5 баллам согласно ГОСТ 19265-73 и 5950-2000. Продольную ось образцов ориентировали таким образом, чтобы она располагалась вдоль строчек (0°), поперек строчек (90°) и под углом 45° к строчкам карбидных включений.

Экспериментальные исследования проводили на испытательном стенде Instron 5000 по схеме, приведенной на рисунке 2.



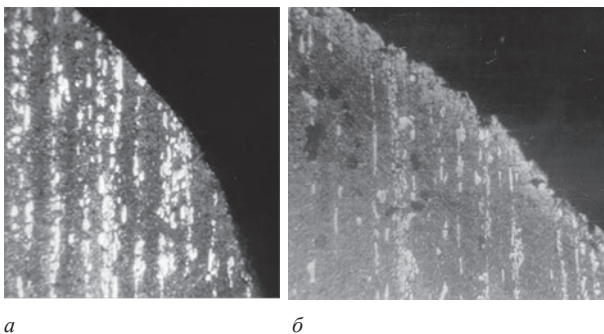
**Рисунок 1 — Объекты исследований:** *a* — образцы для исследования напряженно-деформированного состояния структуры поверхностных слоев сталей ледобуритного класса; *б, в* — матрицы для холодной высадки головки железнодорожных болтов



**Рисунок 2 — Схема деформирования экспериментального образца**

**Результаты исследований и их обсуждение.** Согласно ГОСТ 19265-73 и ГОСТ 5950-73, регламентирующие балл карбидной неоднородности наиболее известных представителей сталей ледобуритного класса Р6М5 и Х12М соответственно, изготовление штампового инструмента из заготовок диаметром более 40 мм приводит к сохранению в структуре инструмента крупных карбидных частиц. Их длина составляет порядка 20 мкм, а размер в поперечнике — 2–3 мкм. При изготовлении матриц со сложнопрофильной поверхностью наиболее удобным способом — электроэрозионной обработкой — ориентация карбидных частиц в месте их выхода на гравюру характеризуется произвольным расположением (рисунок 3). Численное моделирование показало, что наиболее опасной ориентацией является расположение включений под углами 0, 45 и 90° к внешней поверхности материала, подвергающегося растяжению [4].

Экспериментальные результаты оценки прочности стали Р6М5 с различной ориентацией текстурных образований показали, что наиболее высокую прочность — 1660 МПа — имели образцы с продольной ориентацией карбидных строчек. Величина разрушающего напряжения при плоском напряженном состоянии существенно отличается от приведенного в работе [5], полученного



**Рисунок 3 — Микроструктура поверхностного слоя холодновысадочных матриц, формообразующая поверхность которых получена электроэрозионным способом из сталей ледобуритного класса, увеличение  $\times 100$ :** *a* — Х12М; *б* — Р6М5

при испытании на изгиб, составляющего 2300 МПа. Разрушающее напряжение образцов с поперечным расположением карбидных строчек составило порядка 1380 МПа, а при расположении карбидных строчек под углом 45° — 1420 МПа.

Изменение ориентации карбидных строчек оказывает существенное влияние на взаимодействие карбидной фазы и металлической матрицы сплава. При поперечном расположении текстурных строчек карбидной фазы разрушение материала происходит в результате распространения поперечной трещины, незначительно отклоняющейся в процессе роста от первоначального направления. Трещина проходит по границе скопления карбидных частиц, ее продвижение не сопровождается выраженной внутрикристаллической пластической деформацией в твердом растворе стали.

При ином расположении карбидных строчек обнаружено, что процессу зарождения трещины предшествует интенсивное образование линий скольжения за счет дислокационных процессов в твердом растворе, окружающем карбидные включения. Начальные трещины зарождаются на границах между двумя фазами, и лишь в момент своего продвижения в материале образца начинают разделять его в поперечном сечении.

При разрушении образцов с карбидными строчками, расположенными параллельно внешней границе материала, многочисленными линиями скольжения, плотность которых увеличивается по мере приближения к краю магистральной трещины, заполняют все пространство материала матрицы между зонами скопления карбидных включений. При этом распределение локальных деформаций материала гораздо более однородно, чем в рассмотренных выше случаях. Эта особенность подчеркивает способность всех структурных составляющих материала реализовать большую сопротивляемость внешней растягивающей нагрузке, что обеспечивает увеличение локальной прочности до 1660 МПа. Данное значение существенно уступает пределу прочности, приведенному в работе [5], что связано с различием в методиках определения прочностных характеристик.

Анализ результатов испытаний стали Х12М по аналогичной методике показал, что прочность указанного сплава существенно ниже, чем быстрорежущей стали Р6М5. Данная тенденция, отмеченная и в работе [5], получила уточнение, касающееся сравнения прочностных характеристик двух металлов, в которых строчки карбидных включений располагаются под углом 45° к линии приложения внешнего растягивающего напряжения. В частности, результаты испытаний показывают, что образцы из стали Х12М разрушены при напряжении около 237 МПа,

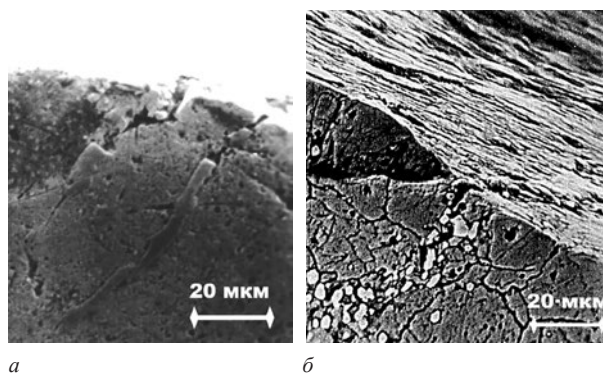
в то время как для быстрорежущей стали этот показатель составил 1419 МПа, практически в 6 раз больше. По нашему мнению, такая разница может объясняться различной степенью легирования твердого раствора указанных сплавов [6]. Эта особенность усилила текстурное влияние на локальную прочность материала и механизм его разрушения.

Полученные результаты являются экспериментальным подтверждением выводов численного моделирования, приведенных в работе [4]. Следовательно, использование легированных сталей для изготовления крупного штампового инструмента должно учитывать влияние текстурных особенностей материала на его локальную прочность. Такой промежуточный вывод диктует необходимость повышенного внимания к технологическим переделам заготовок штамповых сталей, при которых достигается существенное измельчение размеров карбидных включений, а также устранение строчности в их расположении. Эта задача может быть решена применением традиционной термомеханической обработки — трех-пятикратного перекова, который на многих предприятиях широко применяется в условиях базовых заготовительных производств и не требует существенных дополнительных затрат.

Основываясь на сформулированной концепции, были изготовлены две партии холодновысадочных матриц для штамповки болтов железнодорожного крепежа (см. рисунок 1 а, б). Исходная структура заготовки данного инструмента, изготовленного из сталей X12M и P6M5 методом электроэрозионной обработки, приведена на рисунок 3. Балл карбидной неоднородности характерен для исходных заготовок матриц диаметром 80 мм. Для уточнения влияния возможности повышения эксплуатационных характеристик инструмента за счет термомеханической обработки материала заготовок был проведен трехкратный переков, обеспечивший существенное изменение текстурного рисунка сплава.

Промышленная апробация инструмента показала двух и более кратное повышение стойкости при изготовлении болтов железнодорожного крепежа M22×50, M22×70, M22×140 ГОСТ 16016-79 на станке-автомате BV-6 фирмы NEDSCHROEF (Бельгия). Анализ структуры поверхностного слоя инструмента после отказа показал, что причинами его разрушения стали магистральные трещины, зарождающиеся на границе между карбидными включениями и металлической матрицей (рисунок 4). Однако в случае использования перекованной заготовки мелкие карбиды создавали меньшую концентрацию напряжений, что обеспечило повышение стойкости оснастки.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования перекова



**Рисунок 4 — Микроструктура поверхностного слоя холодновысадочных матриц из стали P6M5, формообразующая поверхность которых получена электроэрозионным способом из катанной заготовки (а) и перекованной (б), увеличение ×300**

инструментальных сталей для повышения стойкости штамповой оснастки. Основываясь на изученных особенностях разрушения композиционных сталей, можно сделать вывод о возможности существенного повышения стойкости широкого спектра штамповой оснастки, в том числе и за счет изготовления ее из сталей с меньшим содержанием карбидообразующих легирующих элементов. Такой подход позволит снизить влияние карбидной ликвации и текстурного строения исходного материала при минимальных затратах на переков, по сравнению с достаточно трудоемкими для этой операции быстрорежущими и полутеплостойкими сталями.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP09259236).*

#### Список литературы

1. Chunhui, L. Modeling the Behavior of Inclusions in Plastic Deformation of Steels: Doctoral Thesis: 05.2001 / L. Chunhui. — Stockholm, 2001. — 64 p.
2. Role of inclusions, surface roughness and operating conditions on rolling contact fatigue / D. Nélias [et al.] // Journal of Tribology, ASME. — 1999. — Vol. 121, no. 2. — Pp. 240–251.
3. Beheshti, A. On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect / A. Beheshti, M.M. Khonsari // Tribology International. — 2011. — Vol. 44. — Pp. 1620–1628.
4. Кенько, В.М. К вопросу учета структурных особенностей инструментальных сталей при изготовлении матриц холодновысадочной оснастки / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин // Литье и металлургия. — 2004. — № 4. — С. 110–116.
5. Шейнерман, В.М. Стали для штампов холодного деформирования / В.М. Шейнерман. — Рига: Латв. респ. ин-т науч.-техн. информации и пропаганды, 1969. — 40 с.
6. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник / И. Артингер; пер. с венг. В.П. Романова, Б.В. Климова; под ред. Л.С. Кремнева. — М.: Металлургия, 1982. — 312 с.

Stepankin I.N., Kuis D.V., Pozdnyakov E.P., Nayzabekov A.B., Lezhnev S.N.

#### To the question of improving the structure of tool steels

The paper deals with the effect of carbide segregation on the local strength of steels of the P6M5 (R6M5) and X12M (Kh12M) ledeburite classes. The features of interaction of large carbide inclusions and solid solution of alloys during the destruction of a composite material are revealed, in which the lines of inclusions were located along and across the line of action of the tensile strength, as well as at an angle of 45 degrees to it. It is shown that in the manufacture of large matrices with a complex shaping surface, an arbitrary orientation of carbides limits the tool life during the manufacture of its working surface by the methods of electrical discharge machining. The use of triple re-rolling as a preliminary operation for processing a workpiece significantly increases the operational characteristics of the material by reducing the effect of carbide segregation.

*Поступила в редакцию 08.07.2021.*