



УДК 621.833:621.785.4.52

Поступила 13.06.2016

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПЕРЕДЕЛА НА ВЕЛИЧИНУ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЗЕРНА КОНСТРУКЦИОННОЙ ЦЕМЕНТУЕМОЙ СТАЛИ 20ХН3А

## INFLUENCE OF THE THERMAL PROCESS STAGE ON THE SIZE OF VALID GRAIN OF CONSTRUCTIONAL CARBURIZED STEEL GRADE 20CHN3A

С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, А. А. ШИПКО, А. Н. ЧИЧИН, Объединенный институт  
машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

S. P. RUDENKO, A. L. VALKO, A. A. SHIPKO, A. N. CHICHIN, Joint Institute of Mechanical Engineering  
of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Academicheskaya str. E-mail: sprud.47@mail.ru

*Приведены результаты исследований кинетики изменения величины действительного зерна в процессе технологического передела на разных стадиях изготовления деталей с применением универсального металлографического реактива для выявления границ действительного зерна в прокате, штамповках, цементованных слоях и сердцевине деталей, изготовленных из легированных конструкционных марок сталей.*

*Results of studies of the kinetics of changes in actual grains during technological process at different stages of the manufacture of parts with the use of a universal metallographic etchant to identify borders of valid grains in rolling and stamping in carburizing layers and core parts made of alloy structure steel grades are presented.*

**Ключевые слова.** Конструкционные стали, величина зерна, металлографический реактив.

**Keywords.** Constructional steel, grain, metallographic etchant.

Величина зерна – одна из важнейших структурных характеристик стали, влияющих на качество металла после прокатки, горячей пластической формообразующей деформации и предварительной термической обработки заготовок, а также на долговечность самих деталей. Большинство процессов технологического передела сопровождается изменением величины зерна аустенита [1], поэтому в стали различают три размера зерна [2]: начальное – размер зерна аустенита в момент окончания аустенитного превращения при переходе через критическую точку  $A_1$ ; наследственное (природное) – размер зерна аустенита в момент окончания выдержки при фиксированной температуре, задаваемой в нормативно-технической документации; действительное зерно – размер зерна стали в результате той или иной термической обработки.

Окончательный размер действительного зерна зависит от температуры нагрева стали и ее наследственной зернистости [2]. Размер наследственного зерна является технологическим параметром, характеризующим склонность стали к росту зерна при определенной температуре, что служит одной из определяющих характеристик при выборе стали, по которому различают наследственно мелко- и крупнозернистые стали. Являясь характерной особенностью конкретной плавки стали, размер наследственного зерна оказывает влияние на формирование окончательного размера зерна в процессе термической или термомеханической обработки. Однако до настоящего времени не существует надежных методов установления границы зерна в конструкционной стали, так как при закалке с образованием структуры сорбита настолько затеваются границы бывшего аустенитного зерна, что приходится значительно усложнять методику травления [3].

Для выявления границ бывшего аустенитного зерна при структуре стали, образовавшейся на окончательной стадии термической или химико-термической обработки, существует ряд методов [4]:

- для цементуемых сталей применяется метод науглероживания в свежем твердом карбюризаторе при 925 °С в течение 6–8 ч с последующим медленным охлаждением образца;

- метод контролируемого окисления позволяет обнаруживать границы зерен аустенита, образовавшиеся при температуре термообработки образца из конструкционной стали;
- метод травления насыщенным водным раствором пикриновой кислоты используется для образцов с мартенситной или бейнитной структурой после термообработки.

Рассмотрим достоинства и недостатки перечисленных выше методов. Метод цементации является наиболее распространенным в заводских лабораториях методом выявления величины зерна и применяется для температур нагрева от 900 °С, что позволяет исследовать кинетику роста зерна аустенита до температур вакуумной цементации 1000–1100 °С. Однако этот метод требует длительной выдержки и не применяется для определения величины аустенитного зерна при нагреве под термообработку до 900 °С. Следует также учитывать, что зерно определяется в стали с измененным против первоначального содержанием углерода в твердом растворе. Для успешного обнаружения зерна методом науглероживания немаловажное значение имеет режим медленного охлаждения образцов до 600 °С.

Метод контролируемого окисления имеет широкий температурный диапазон и применяется для выявления исходного зерна аустенита конструкционных и инструментальных сталей. В частности, данный метод широко применяется на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» и обладает следующими особенностями: приготовленные образцы-шлифы помещаются в печь полированной стороной вверх; производится нагрев и выдержка образцов в нейтральной атмосфере при требуемой температуре аустенитизации, затем в печь подается воздух на 10–15 с и выполняется закалка образца в воде. Избирательное окисление границ позволяет определять размер зерна, формирующийся при различных температурных режимах термической или деформационной обработки. К недостатку можно отнести необходимость применения нейтральной атмосферы при температурах нагрева выше 750 °С. Помимо этого, при обогащении поверхности стали кислородом может образовываться искусственно мелкое зерно.

Метод травления насыщенным водным раствором пикриновой кислоты применяют для установления границ действительного зерна термически обработанных сталей, а также исходного аустенитного зерна, размер которого фиксируется после выдержки образца при заданной температуре при закалке в воду. Данный метод незаменим в случаях, когда затруднено получение цементитной или ферритной сетки. Выявление границ действительного или исходного зерна аустенита методом травления в отличие от методов цементации или окисления проводят на образцах без дополнительной термической обработки. При установлении границ зерен температуру нагрева, время выдержки и скорость охлаждения определяют согласно нормативно-технической документации на сталь. Универсальный металлографический реактив для травления сталей – водный раствор пикриновой кислоты с добавлением 0,5–2,0 мас.% алкилсульфоната натрия [5].

В настоящей статье основное внимание уделено выявлению границ бывших аустенитных зерен в легированных конструкционных сталях.

На рис. 1 приведены микроструктуры цементованной стали 20ХНР, полученные при травлении в упомянутом универсальном реактиве. Из рисунка видно нечеткое и неравномерное выявление границ дей-

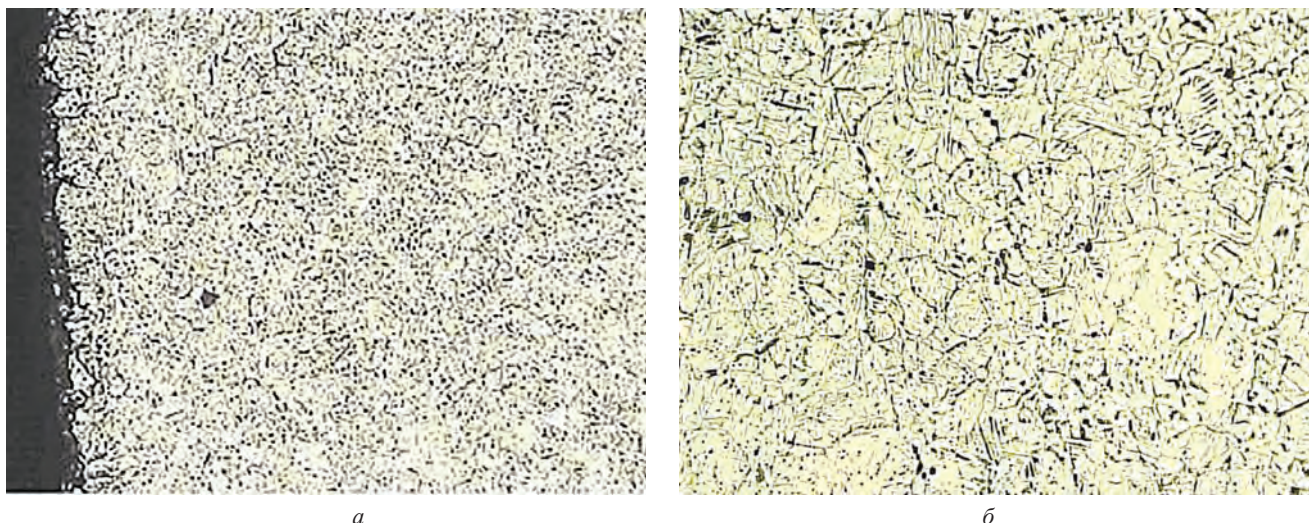


Рис. 1. Микроструктура цементованной стали 20ХНР, выявленная при травлении в общепринятом реактиве [4, 5]: *а* – цементованный слой; *б* – сердцевина. х400



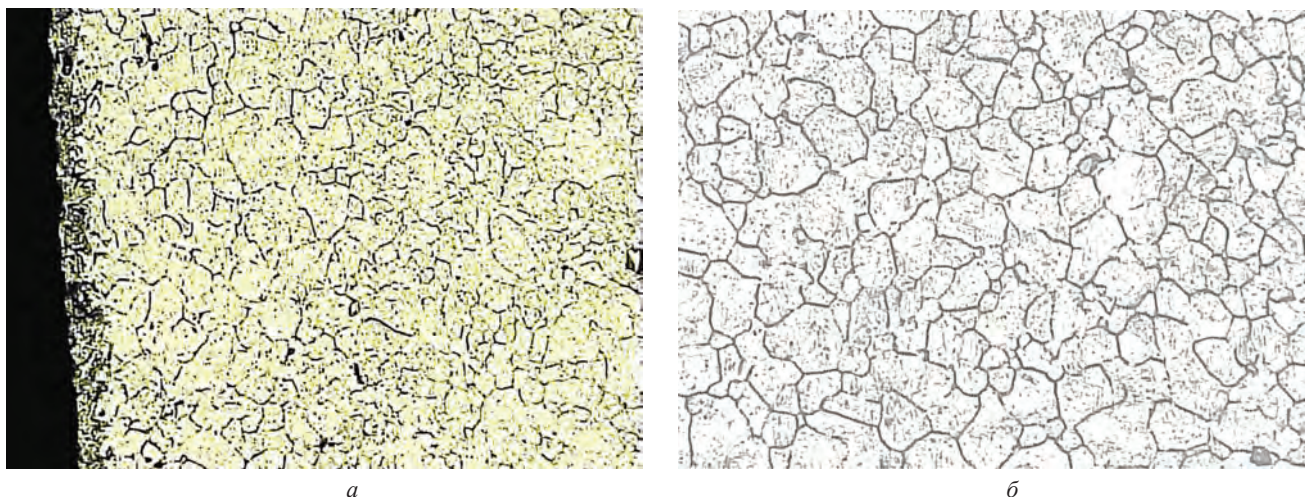


Рис. 2. Микроструктура цементованной стали 20ХНР, выявленная при травлении в разработанном реактиве [6]: *а* – цементованный слой; *б* – сердцевина. х400

ствительного зерна по сечению образца, что делает затруднительным определение его величины. Кроме того, к недостаткам травления данным реактивом следует отнести образование на поверхности исследуемого образца нерастворимых продуктов химических реакций, что вызывает необходимость неоднократного повторения травления с использованием промежуточных переполировок шлифа [4]. Все это указывает на ненадежность распространенного в промышленности метода установления границ зерна цементованных сталей.

С целью качественного выявления границ бывших аустенитных зерен деталей из конструкционных сталей после химико-термической обработки разработан реактив [6], включающий водный раствор пикриновой кислоты с добавлением 0,1–0,6 мас.% оксиэтиллированного лаурилсульфата натрия и 0,5–3,0 мас.% нитрата аммония.

На рис. 2 приведены образцы микроструктуры цементованной стали 20ХНР, выявленные при травлении в разработанном реактиве. Из рисунка видно, что травление в разработанном реактиве в отличие от общепринятого травления позволяет более четко обнаруживать границы действительного зерна в цементованных слоях и сердцевине деталей, изготовленных из конструкционных цементуемых марок сталей, что значительно повышает надежность и достоверность контроля качества структурно-упрочненных деталей.

Представленные результаты исследований показывают возможности использования разработанного реактива для выявления границ действительного зерна широкого спектра конструкционных сталей методом травления.

Наследственный (природный) размер зерна аустенита контролируется на металлургических комбинатах при изготовлении стального проката. При дальнейшем термическом или технологическом переделе проката зерно может укрупняться или измельчаться, причем с ростом скорости нагрева и охлаждения степень измельчения зерна увеличивается [8]. С целью изучения кинетики изменения действительного зерна в процессе технологического передела выполнялось определение его величины для образцов из широко применяемой в промышленности стали 20ХН3А на разных стадиях изготовления деталей. Химический состав исследованных образцов приведен в таблице.

Химический состав стали 20ХН3А

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Nb	P	S
20ХН3А	0,199	0,404	0,289	0,749	2,814	0,035	0,063	0,028	0,002	0,006	0,010	0,008

На рис. 3 приведена микроструктура стали 20ХН3А с величиной наследственного аустенитного зерна № 8, выявленного в соответствии с п. 6.3.2 [4] методом травления по патенту № 14748 [6] и методом науглероживания в соответствии с п. 6.3.4 [4].

Получено, что при одинаковой величине выявленного обоими методами наследственного аустенитного зерна метод травления с использованием разработанного реактива [6] позволяет установить грани-



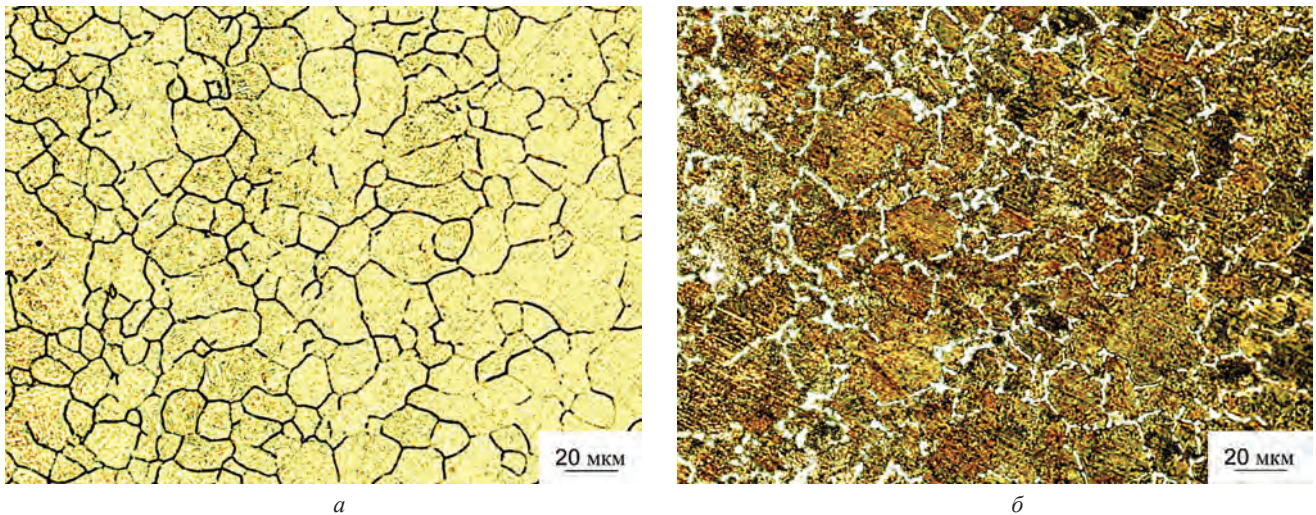


Рис. 3. Величина наследственного зерна аустенита, выявленного методом травления по патенту № 14748 (а) [6] и методом науглероживания в соответствии с п. 6.3.4. ГОСТ Р ИСО 643 (б). Прокат стали 20ХН3А, плавка Э82587 ЧМК, зерно № 8

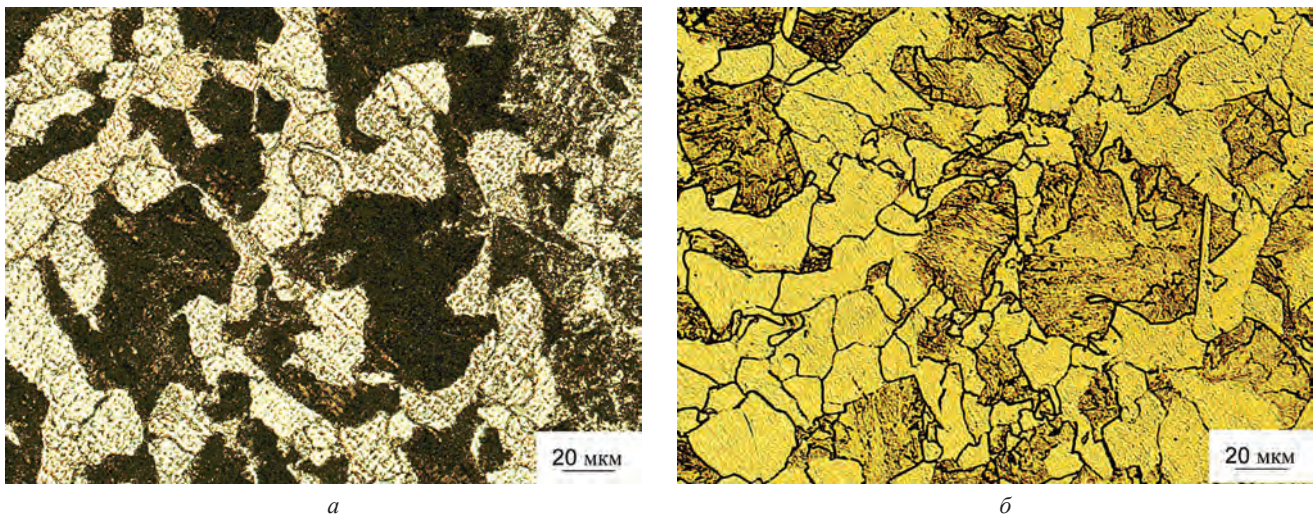


Рис. 4. Микроструктура проката стали 20ХН3А, плавка Э82587 ЧМК: феррит, перлит. а – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте; б – травление по патенту 14748 [3], зерно № 8

цы зерен более контрастно, причем диаметр зерна не уменьшается искусственно за счет толщины цементитной сетки.

В результате металлографических исследований структуры проката стали 20ХН3А (рис. 3, 4) установлено, что размер зерна такой же, как и наследственного, и соответствует по среднему размеру зерна № 8 ГОСТ Р ИСО 643. Следует отметить, что травление в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте не позволяет объективно определять размер зерна. В этом случае величина зерна определяется по зерну феррита (светлые участки травления, рис. 4, а). Однако видимое зерно феррита в свою очередь состоит из нескольких субзерен, границы которых при травлении в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте не обнаруживаются.

Рассмотрим постадийно влияние термического передела на величину действительного зерна конструкционной цементуемой стали 20ХН3А после отжига, нормализации, штамповки и нормализации с высоким отпуском, химико-термической обработки (газовой цементации, высокого отпуска, закалки, низкого отпуска).

На рис. 5 приведена микроструктура проката стали 20ХН3А после отжига при 930 °С, 1 ч выдержки, с последующим охлаждением в печи. Из рисунка видно, что после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте (рис. 5, а) появляется зерно № 7–8 при феррито-перлитной структуре. Травление этого же образца по патенту 14748 (рис. 5, б) выявляет зерно № 7–8. В данном случае результаты исследований величины зерна при равновесной феррито-перлитной структуре совпадают и показывают, что при медленном охлаждении величина зерна стали 20ХН3А несколько укрупняется путем



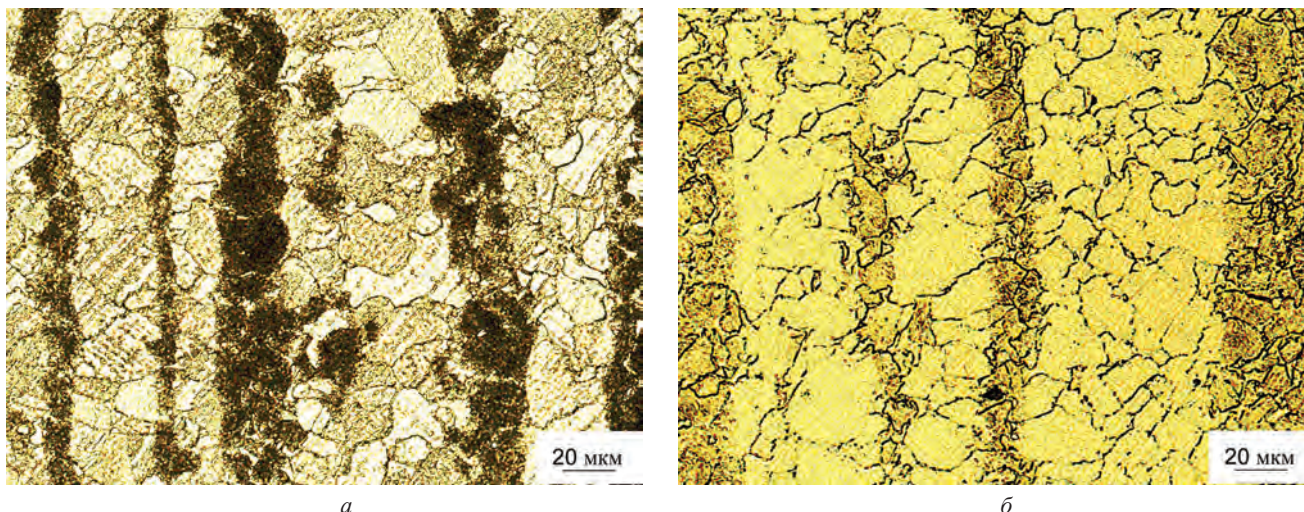


Рис. 5. Микроструктура проката стали 20ХН3А после отжига, плавка Э82587 ЧМК: феррит, перлит. *а* – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте; *б* – травление по патенту 14748 [6]

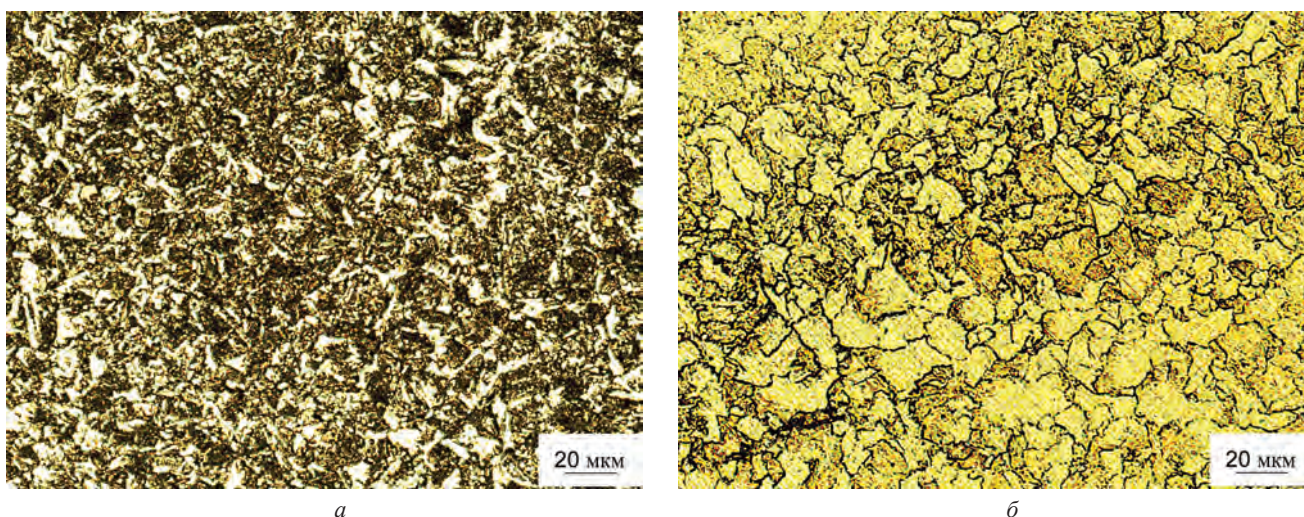


Рис. 6. Микроструктура проката стали 20ХН3А после нормализации, плавка Э82587 ЧМК: феррит и сорбитообразный перлит. *а* – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте; *б* – травление по патенту 14748 [6]

собирательной рекристаллизации по сравнению с наследственным зерном, несмотря на идентичность температур нагрева.

На рис. 6 приведена микроструктура проката стали 20ХН3А после нормализации при 930 °С, 1 ч выдержки, с последующим охлаждением на воздухе. Получено, что после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте (рис. 6, *а*) зерно не обнаружено, а после травления этого же образца по патенту 14748 выявляется зерно № 8–9. Таким образом, при увеличении скорости охлаждения величина зерна стали 20ХН3А незначительно измельчается на один номер по сравнению с наследственным зерном. Структура стали после нормализации представляет собой сорбитообразный перлит и для установления границы зерна необходимо применять метод окисления или травления по разработанному патенту.

При горячем прессовании имеют место большие степени деформации, поэтому при охлаждении поковки, в зависимости от степени и температуры деформации, протекает статический возврат или статическая рекристаллизация [7]. С целью формирования равноосной мелкозернистой структуры и снятия напряжений после горячей штамповки заготовок из конструкционных сталей выполняют отжиг, разновидность которого определяется степенью легированности стали. В нашем случае использована нормализация с последующим высоким отпускком. В результате при охлаждении поковки произошла перекристаллизация деформированной структуры с неравноосным зерном, что привело к формированию действительного зерна № 8–9 (рис. 7). Дифференцированная феррито-перлитная структура способствует повышению скоростей резания и хорошему качеству обработанных поверхностей при механической обработке заготовок.



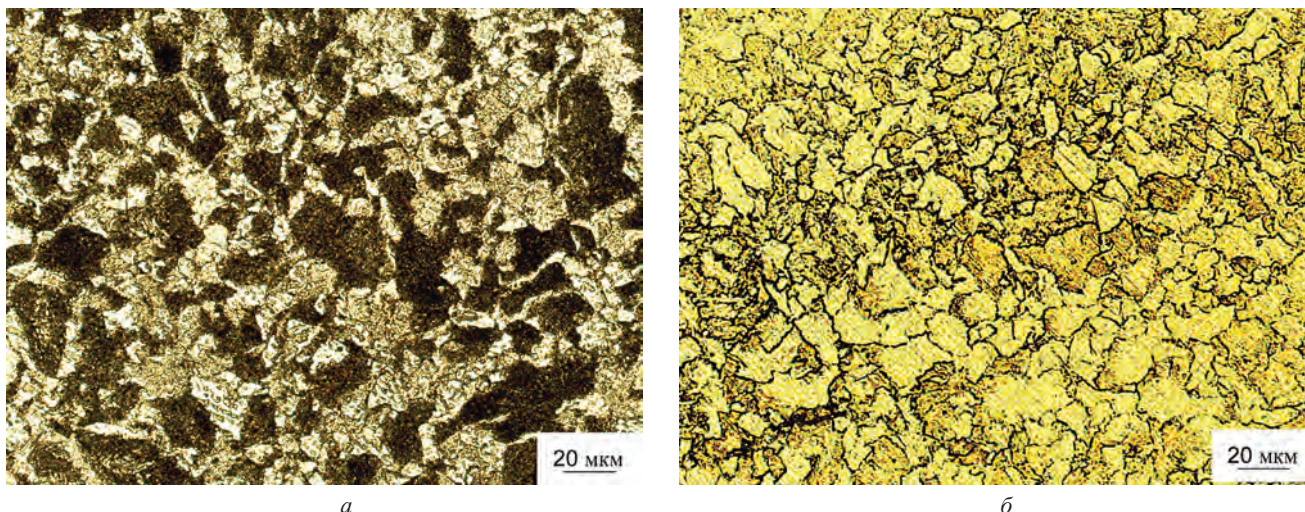


Рис. 7. Микроструктура стали 20ХН3А плавки Э82587 ЧМК после штамповки и нормализации с высоким отпуском, зерно № 9: *а* – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте; *б* – травление по патенту 14748 [6]

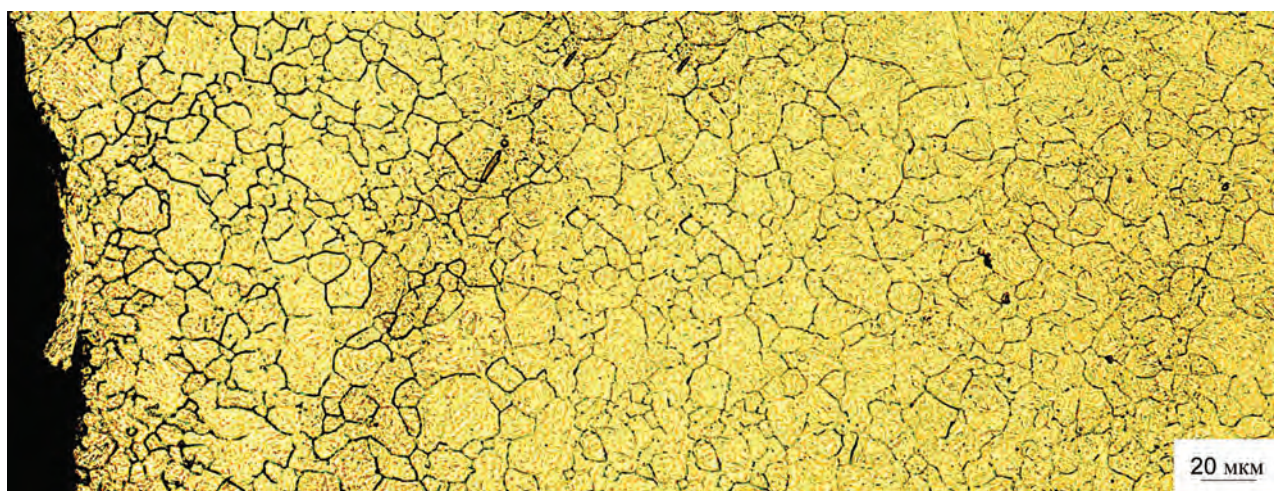


Рис. 8. Микроструктура цементованного слоя стали 20ХН3А плавки Э82587 ЧМК после химико-термической обработки: мелкоигольчатый мартенсит, остаточный аустенит, зерно № 8–9. Травление по патенту 14748 [3]

Исследования микроструктуры деталей из стали 20ХН3А после химико-термической обработки (газовая цементация при 930 °С, высокий отпуск при 650 °С, закалка с 840 °С, низкий отпуск при 180 °С) показали, что величина зерна цементованного слоя составляет № 8–9, сердцевины – № 8 (рис. 8).

Таким образом, проведенные исследования показали, что величина действительного зерна стали 20ХН3А на разных стадиях технологического передела составляет: в прокате – № 8 и идентична величине наследственного зерна аустенита, после полного отжига проката укрупняется на один номер, после нормализации проката, а также штамповки, нормализации и высокого отпуска – № 9; после химико-термической обработки – № 8–9 для цементованного слоя и № 8 для сердцевины.

### Выводы

Применение универсального металлографического реактива позволяет без проведения дополнительных термических обработок более четко и качественно выявлять границы бывшего аустенитного зерна в прокате, штамповках, цементованных слоях и сердцевине деталей, изготовленных из конструкционных цементуемых марок сталей, что значительно повышает надежность и достоверность контроля качества структуры поверхностно-упрочненных деталей. Получено, что величина наследственного зерна аустенита стали 20ХН3А, выявленного методом травления по патенту № 14748 и общепринятым методом цементации в соответствии с п. 6.3.4. ГОСТ Р ИСО 643, равнозначна и равна № 8.

Величина действительного зерна на разных стадиях технологического передела изменяется незначительно: от № 8 для проката до № 9 после нормализации и штамповки с последующей нормализацией и высоким отпуском и № 8–9 после химико-термической обработки с температурой цементации 930 °С. Полный отжиг укрупняет величину зерна на один номер.

## Литература

1. Гольдштейн Я. Е. Низколегированные стали в машиностроении. М., Свердловск: Машгиз, 1963. 240 с.
2. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Чертов В. М. Выявление действительного аустенитного зерна в конструкционной стали // *Металлург*. 2010. № 3. С. 55–56.
4. ГОСТ Р ИСО 643. Сталь. Металлографическое определение наблюдаемого размера зерна.
5. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. М.: Металлургия, 1981. 120 с.
6. **Металлографический реактив для выявления границ действительного зерна стали:** пат. 14748, Республика Беларусь: МПК С 23 F 1/28 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, А. А. Шипко, Е. И. Мосунов; заявитель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – № а20100154; заявл. 04.02.2010; опубл. 30.08.2011 // Афіцыйны бюл. / Вынаходства. Карасныя мадэлі. Прамысловыя узоры. 2011. № 4. С. 109.
7. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977. 432 с.
8. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. М.: Металлургия, 1973. 208 с.

## References

1. Goldshtein Ya. E. *Nizkolegirovannyye stali v mashinostroenii* [Low-alloy steel in engineering]. Moscow–Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1963. 240 p.
2. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
3. Chertov V. M. Vyyavlenie deystvitelnogo austenitnogo zerna v konstruktsionnoy stali [Identification of actual austenite grain in structural steel]. *Metallurg = Metallurgist*. 2010, no. 3, pp. 55–56.
4. GOST R ISO 643-2011. *Stal. Metallograficheskoe opredelenie nablyudaemogo razmera zerna* [GOST R ISO 643-2011. Steels. Micrographic determination of the apparent grain size]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 53 p.
5. Kovalenko V. S. *Metallograficheskie reaktivy* [Metallographic etchants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 120 p.
6. Valko A. L., e. a. *Metallograficheskiy reaktiv dlya vyyavleniya granits deystvitelnogo zerna stali* [Metallographic reagent to identify the boundaries of the actual grain steel]. Patent RB no. 14748, 2011.
7. Bernshteyn M. L. *Struktura deformirovannykh metallov* [Structure of deformed metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 432 p.
8. Sadovskiy V. D. *Strukturnaya nasledstvennost v stali* [Structural heredity in steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 208 p.