

**EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE  
OF STEEL GRADE 35XM IN PROCESS ECAP****A.B. Nayzabekov<sup>1</sup>, S.N. Lezhnev<sup>1</sup>, G.G. Kurapov<sup>2</sup>, I.E. Volokitina<sup>2</sup>, E.P. Orlova<sup>2</sup>,**<sup>1</sup>Rudny Industrial Institute, Rudny;<sup>2</sup>Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty,  
[naizbekov57@mail.ru](mailto:naizbekov57@mail.ru), [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru), [kurapov1940@mail.ru](mailto:kurapov1940@mail.ru), [irinka.vav@mail.ru](mailto:irinka.vav@mail.ru)**Keywords:** microstructure, ECAP, thermal treatment, steel, microhardness.

**Abstract.** This work is devoted to research the impact of the initial structural state of steel 35XM to obtaining subultrafinegrain structure at ECA-pressing in equal channel step die. The choice of this direction of researches related to the fact that just equal channel angular pressing is not always fully provides metal with ultrafinegrain structure for a small number of cycles, and for this preliminary and final thermal treatment are expedient to use.

The minimum grain size obtained during the pressing steel in equal channel step die is in the range of 0.7 microns and after 6 deformation cycles and preliminary thermal treatment operation - isothermal annealing is achieved.

From the obtained results it is evident that at the sixth cycle of deformation steel 35XM, both after preliminary annealing, and the normalized condition with subsequent high tempering is possible to obtain subultrafinegrain structure, whereas during pressing of the same steel in the initial hot deformed state even after eight cycles of ECAP it is unable to receive. Thus, researches have shown that a preliminary heat treatment such as annealing of the 2nd kind and normalization with the subsequent high tempering operations are appropriate before the ECAP, as it is due to such preliminary treatment is possible to obtain subultrafinegrain structure.

УДК 621.771

**ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ МАРКИ 35XM  
В ПРОЦЕССЕ РКУП****А.Б. Найзабеков<sup>1</sup>, С.Н. Лежнев<sup>1</sup>, Г.Г. Курапов<sup>2</sup>, И.Е. Волокитина<sup>2</sup>, Е.П. Орлова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Рудненский индустриальный институт, Рудный;<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И. Сатпаева, г. Алматы,  
[naizbekov57@mail.ru](mailto:naizbekov57@mail.ru), [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru), [kurapov1940@mail.ru](mailto:kurapov1940@mail.ru), [irinka.vav@mail.ru](mailto:irinka.vav@mail.ru)**Ключевые слова:** микроструктура, РКУП, термическая обработка, сталь, микротвердость.

**Аннотация.** Данная работа посвящена исследованию влияния исходного структурного состояния стали марки 35XM на получение субультрамелкозернистой структуры при РКУ-прессовании в равноканальной ступенчатой матрице. Выбор данного направления исследований связан с тем, что просто равноканальное угловое прессование не всегда в полной мере обеспечивает получение металла с ультрамелкозернистой структурой за небольшое количество циклов и для этого целесообразно использовать предварительную и окончательную термическую обработку.

Минимальный размер зерна, полученный в ходе прессования стали в равноканальной ступенчатой матрице, лежит в пределах 0,7 мкм и достигается после проведения 6 циклов деформирования и предварительной термической операции – изотермической отжига.

Из полученных результатов видно, что на шестом цикле деформирования стали 35ХМ, как после проведения предварительного отжига, так и в нормализованном состоянии с последующим высоким отпуском удастся получить субультрамелкозернистую структуру, тогда как при прессовании той же стали в исходном горячедеформированном состоянии не удастся ее получить даже после проведения восьми циклов РКУП. Таким образом, исследования показали, что проведение предварительной термообработки такой, как отжиг 2-го рода и нормализация с последующим высоким отпуском являются целесообразными операциями перед РКУП, так как именно благодаря такой предварительной обработке удастся получить субультрамелкозернистую структуру.

### **Введение**

За последние годы выполнено большое количество работ по изучению субмикроструктурной и нанокристаллической структуры в чистых металлах Al[1], Cu [2], Ti[3] и Ni[4] и армко-железе[5,6]. Но в последнее время все больше работ направлено на изучение стали, которые показывают также хорошую перспективу использования методов ИПД для измельчения структуры сталей [7-9].

Данная работа посвящена исследованию влияния исходного структурного состояния стали марки 35ХМ на получение субультрамелкозернистой структуры при РКУ-прессовании в равноканальной ступенчатой матрице. Выбор данного направления исследований связан с тем, что просто равноканальное угловое прессование не всегда в полной мере обеспечивает получение металла с ультрамелкозернистой структурой за небольшое количество циклов и для этого целесообразно использовать предварительную и окончательную термическую обработку.

Исходное состояние материала оказывает большое влияние на процесс создания дислокационной структуры, её термомеханическую стабилизацию и после последующей обработки на свойства материала. Наличие в составе сталей легирующих элементов, например, таких как Mo, являющихся сильными карбидообразователями, способствует их дисперсионному твердению и препятствует миграции границ зерен во время отжигов. Соответственно, повышение дисперсности и плотности карбидов и более однородное их распределение в объеме материала позволяют повысить прочностные свойства и термическую стабильность структур, полученных методами ИПД. Такой эффект может быть достигнут не только в результате ИПД, но и за счет оптимизации исходного состояния стали до РКУП. Роль предварительной обработки также заключается в изменении вязкости, пластичности, обрабатываемости, формы и величины зерна, выравнивании химического состава, снятии внутренних напряжений[10].

Исследование структуры сталей в различных исходных структурных состояниях (мартенситном, феррито-перлитном) при ИПД дают возможность рассмотреть процессы формирования зерна в зависимости от исходного фазового и структурного состояния стали, а также получить представления о влиянии основных упрочняющих факторов, таких, как размер зерна или структурных составляющих, дисперсности и объемной доли дисперсных частиц на прочностные свойства и стабильность субмикроструктурной структуры к нагреву[11].

### **Методы исследования**

Материалом исследования является конструкционная низколегированная сталь марки 35ХМ с феррито-перлитной структурой. До РКУП в ступенчатой матрице образцы были подвергнуты предварительной термической обработке: отжигу, закалке и нормализации по стандартному режиму. Образцы квадратного сечения 15×15×70 мм подвергали РКУП в равноканальной ступенчатой матрице с углом стыка каналов 125° по маршруту Вс с кантовкой заготовки на 90° вокруг продольной оси, так как данный маршрут позволяет формировать беспористые стальные заготовки с квазиравноосными фрагментами структуры и преимущественно большеугловыми разориентировками между ними [12]. Трение между инструментом и заготовкой снижалось применением пальмового масла в качестве смазки.

Известно, что при формировании УМЗ структур очень важно проводить прессование при нагреве, не превышающем верхний уровень температуры деформирования материалов, ограниченный порогом начала рекристаллизации. С увеличением количества циклов прессования

возрастает и степень накопленной деформации материала, металл упрочняется и становится более дефектным, что также ведет к снижению порога начала рекристаллизации.

В связи с тем, что при температуре рекристаллизации новые зерна образуются медленно, холоднодеформированные металлы и сплавы нагревают до более высокой температуры, например железо и низкоуглеродистую сталь до 600—700° С. Образцы в исходном состоянии подвергались прессованию при  $t=550$  °С с кантовкой на 90° вокруг вертикальной оси. В ходе эксперимента реализовано 6 циклов равноканального углового прессования.

Исследование микроструктуры стали выполнялось методом световой микроскопии на микроскопе «Leica» при увеличениях от 100 до 1000 крат. Электронно-микроскопические исследования были выполнены на растровом сканирующем микроскопе JSM 5910 при ускоряющем напряжении 25 кВ в режиме вторичных и упруго отраженных электронов.

### Результаты исследования и их обсуждение

Исходная микроструктура стали марки 35ХМ состоит из феррита и перлита (рисунок 1), которая и характерна для низколегированной стали с содержанием углерода 0,35 %. Размер перлитных колоний соответствует баллу зерна № 7-10 (26-12 мкм). Размер зерна феррита соответствует баллу № 9-10 (15-10 мкм).

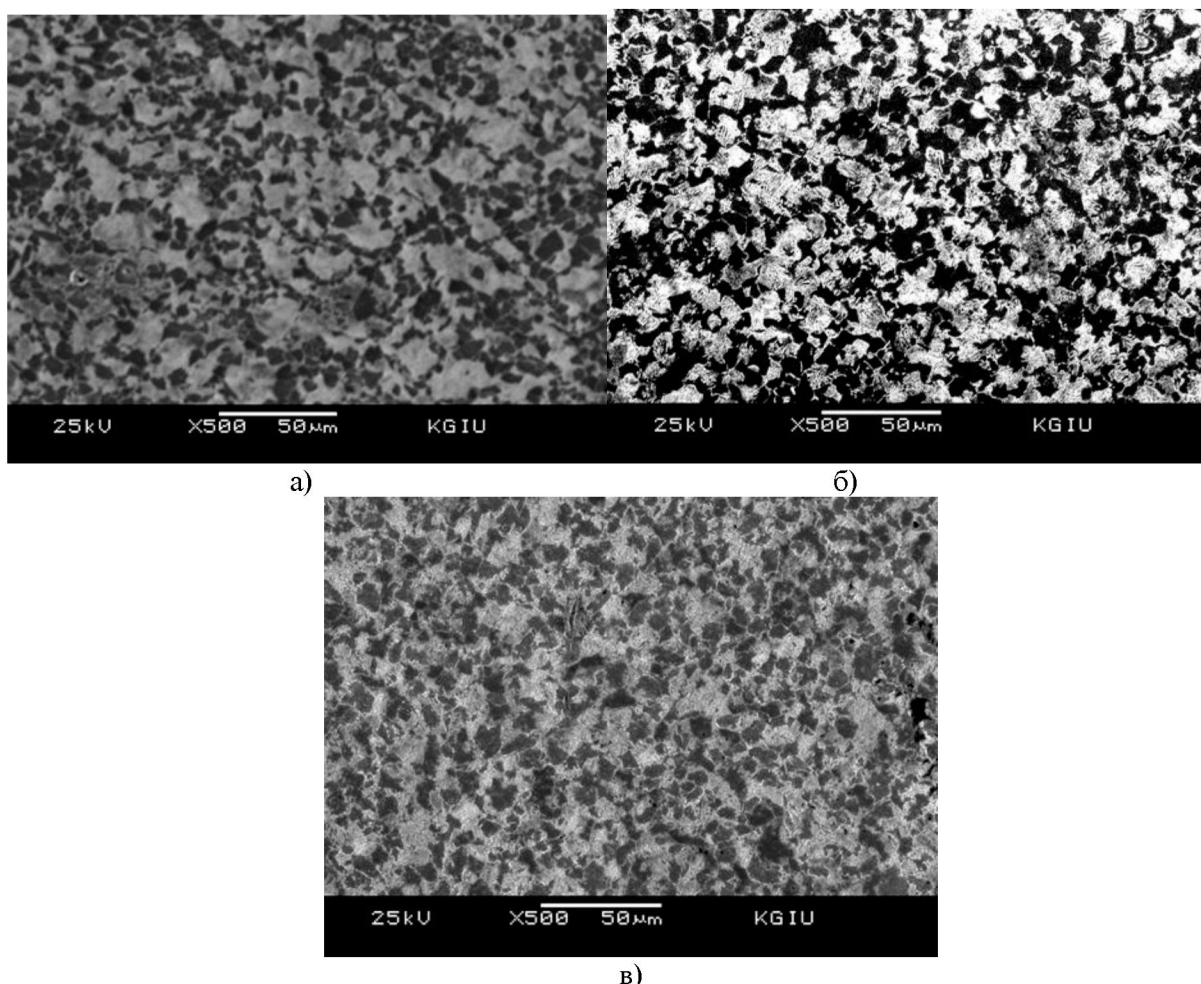


Рисунок 1 – Микроструктура образцов из стали марки 35ХМ в исходном состоянии, наблюдаемая с помощью РЭМ при  $\times 500$ :  
а – без термообработки, средний размер зерен 18 мкм; б – отожженный образец, средний размер зерен 15,5 мкм; в – после нормализации и высокого отпуска, средний размер зерен 13 мкм;

Микроструктура стали марки 35ХМ после отжига от 860°C состоит из феррита и пластинчатого перлита. Хром и молибден находится в цементите перлита. Полученная структура является однородной и нефрагментированной.

Сканирующая микроскопия показала, что пакетный перлит содержит ферритные прожилки толщиной 0,03-0,2 мкм и цементитные прожилки толщиной 0,02-0,18 мкм.

В результате проведения предварительной термической обработки - нормализация (860 °С) + высокий отпуск (650 °С) получена структура зернистого перлита, балл зерна которого соответствует № 8-13 (21-4,5 мкм) и феррита с баллом зерна № 9-13 (13-4,5).

Для оценки влияния РКУП на эволюцию структуры стальных заготовок без термической обработки, проведены металлографические исследования. Результаты исследования приведены на рисунке 2.

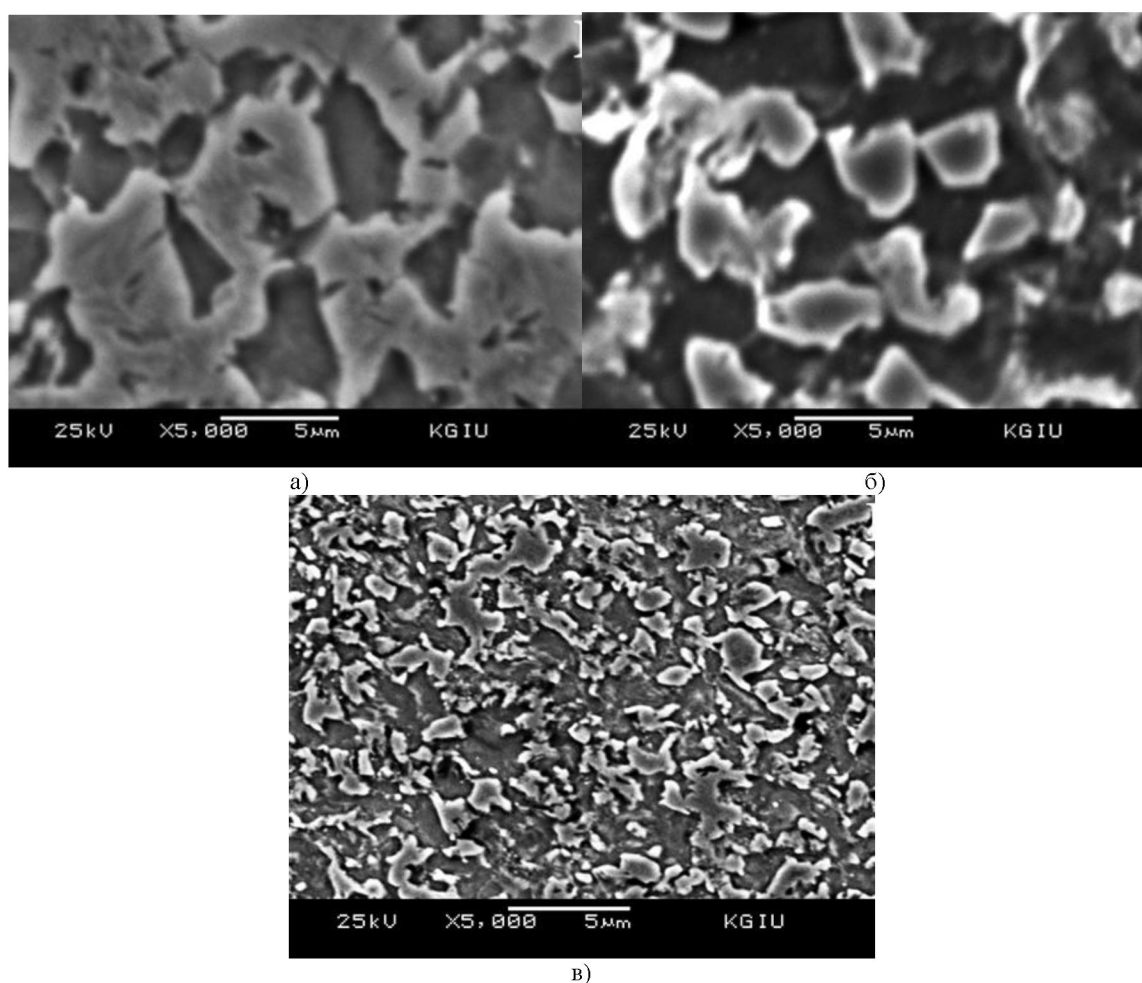


Рисунок 2 – Микроструктура стали марки 35ХМ без термообработки после РКУП:  
а – 2 прохода, размер зерен 11–7 мкм; б – 4 прохода, размер зерен 7–2 мкм;  
в – 6 проходов, размер зерен 3,5–0,2 мкм

Электронно-микроскопическим методом было выявлено формирование субструктуры при РКУП. В исследуемой стали наблюдаются перлитные зерна в ферритной матрице. В перлитных участках не обнаружены ферритные промежутки и цементитные пластины (по сравнению с состоянием до обработки методом РКУП).

В ходе исследования микроструктуры было выявлено, что после каждого цикла деформирования зерно значительно измельчается. Интенсивное измельчение структурных составляющих происходит до 6-го цикла деформирования, при котором удалось получить относительно неоднородную зеренную и субзеренную структуру с размером 0,2—3,5 мкм.

Цементитные частицы размером от 3500 до 200 нм имеют несферическую форму. Полученная структура значительно мельче исходной, что приводит к улучшению качества обрабатываемого материала.

В ходе эксперимента сталь марки 35ХМ со средним размером зерна 18 мкм без проведения предварительной термообработки после РКУП измельчилась в 10 раз, после чего средний размер зерна составил 1,8 мкм.

Структурообразование, происходящее в ходе РКУП, представляет собой результат интенсивного наклепа, релаксации напряжений и динамического возврата, вследствие этого дислокационная структура эволюционирует и формируется частично субультрамелкозернистое строение металла.

Для оценки влияния РКУП на эволюцию структуры стальных заготовок в отожженном состоянии, проведены металлографические исследования. Результаты исследования приведены на рисунке 3.

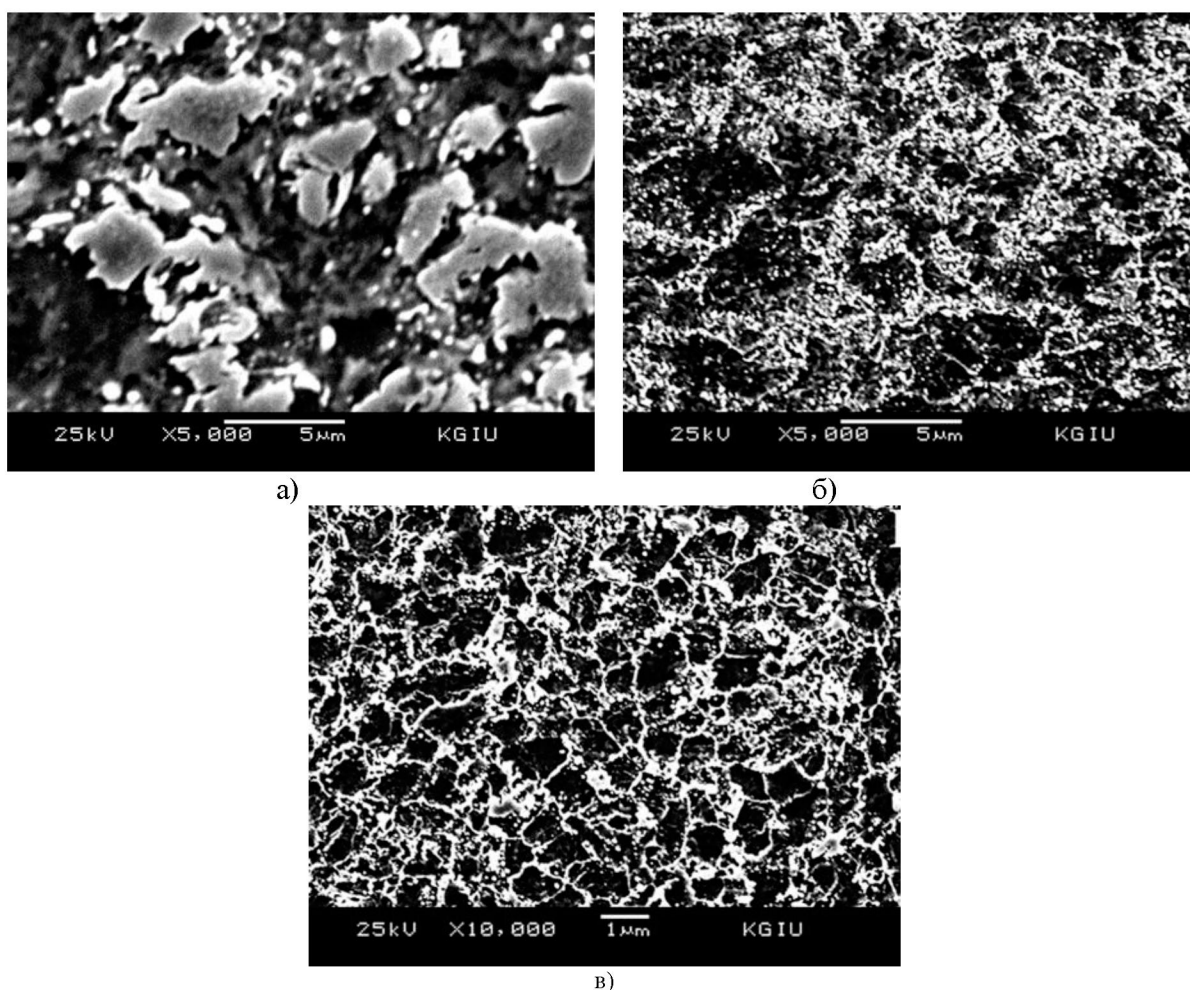


Рисунок 3 – Микроструктура стали марки 35ХМ в отожженном состоянии после РКУП:  
 а – 2 прохода, размер зерен 4-1,5 мкм; б – 4 прохода, размер зерен 3,8-0,3 мкм;  
 в – 6 проходов, размер зерен 1,3-0,19 мкм

В ходе исследования микроструктуры стальных образцов было выявлено, что с увеличением циклов деформирования зерно измельчается. Образование субультрамелкозернистой структуры наблюдается уже на 4-ом цикле прессования, в отличие от прессования стали в исходном состоянии, где измельчение структурных составляющих до субразмеров происходит на 6-ом цикле деформирования.

В результате РКУП стали в отожженном состоянии удалось получить более однородную структуру с размером 0,19—1,3 мкм. Цементитные частицы размером от 1300 до 190 нм имеют

несферическую форму. После проведения восьми циклов деформирования размер зерен изменился незначительно, по сравнению с шестью циклами прессования и составил 1,3-0,16 мкм. Полученная структура значительно мельче исходной, что говорит о целесообразности проведения предварительного отжига 2-го рода.

В ходе эксперимента сталь марки 35ХМ со средним размером зерна 18 мкм после проведения совместной операции предварительной термообработки – изотермического отжига и РКУП измельчилась в 26 раз, после чего средний размер зерна составил 0,7 мкм.

Для оценки влияния РКУП на эволюцию структуры стальных заготовок в нормализованном состоянии, проведены металлографические исследования. Результаты исследования приведены на рисунке 4.

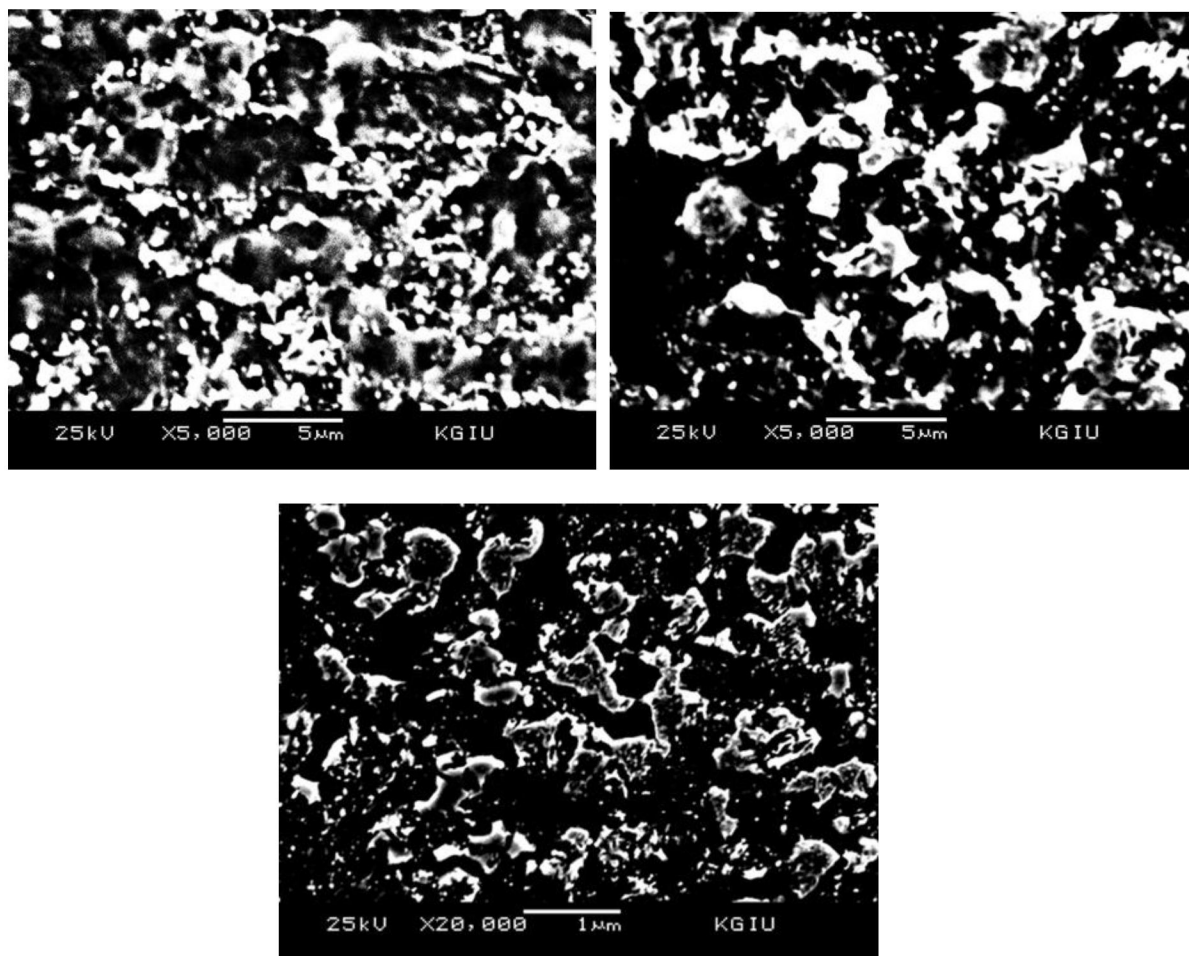


Рисунок 4 – Микроструктура стали марки 35ХМ в нормализованном состоянии после РКУП:  
а – 2 прохода, размер зерен 6,5–1,5 мкм; б – 4 прохода, размер зерен 4–1,2 мкм;  
в – 6 проходов, размер зерен 1,1–0,26 мкм

В ходе эксперимента сталь марки 35ХМ со средним размером зерна 18 мкм после проведения совместной операции предварительной термообработки – нормализации с высоким отпуском и РКУП измельчилась в 26 раз, после чего средний размер зерна составил 0,7 мкм.

Анализ микроструктуры стали марки 35ХМ показал, что интенсивное измельчение зерна наблюдается после осуществления каждого цикла деформирования. Полученная структура значительно мельче исходной, и практически одинакова с микроструктурой, полученной в результате прессования в отожженном состоянии. Минимальный размер зерна, полученный в ходе прессования стали в равноканальной угловой матрице, лежит в пределах 1,1-0,26 мкм и достигается после проведения 6 циклов деформирования, тогда как при прессовании стали в отожженном состоянии получение субультрамелкозернистой структуры достигается уже на

четвертом цикле деформирования, что говорит о преимуществе проведения изотермического отжига перед процессом РКУП.

### Выводы

Из полученных результатов видно, что на шестом цикле деформирования стали 35ХМ, как после проведения предварительного отжига, так и в нормализованном состоянии с последующим высоким отпуском удастся получить субультрамелкозернистую структуру, тогда как при прессовании той же стали в исходном горячедеформированном состоянии не удастся ее получить даже после проведения восьми циклов РКУП. Таким образом, исследования показали, что проведение предварительной термообработки такой, как отжиг 2-го рода и нормализация с последующим высоким отпуском являются целесообразными операциями перед РКУП, так как именно благодаря такой предварительной обработке удастся получить субультрамелкозернистую структуру.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов К.В., Найденкин Е.В. Особенности структуры и механических свойств чистого алюминия и сплава 1420 после воздействия интенсивной пластической деформации. Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 2.
- [2] Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Волокитина И.Е. Изменения микроструктуры и механических свойств меди при деформировании ее в равноканальной ступенчатой матрице. Металловедение и термическая обработка металлов. 2015 №5. С. 12-17.
- [3] Motyka M. The influence of initial plastic deformation on microstructure and hot plasticity of  $\alpha+\beta$  titanium alloys / M. Motyka, J. Sieniawski // *Materials Science and Engineering*. - 2010. - vol. 41. - No. 2. - P. 95-103.
- [4] Cheng S. Cyclic deformation of nanocrystalline and ultrafine-grained nickel / S. Cheng, J. Xie, A.D. Stoica, X.-L. Wang, J.A. Horton, D.W. Brown, H. Choo, P.K. Liaw // *Acta Mater.* -2009.-V.57. -P.1272–1280.
- [5] Sus-Ryszkowska M., Wejrzanowski T., Pakiela Z., Kurzydowski K. *J. Mater. Sci. Eng.* A369, 151 (2004).
- [6] Nazra S.S., Gazder A.A., Pereloma E.V. *Mater. Sci. Eng.* A524, 158 (2009).
- [7] Валиев Р. З., Рааб Г. И., Мурашкин М. Ю. Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов. Кузнечно-штамповое производство. 2008. №11. С. 5-12.
- [8] Эфрос Н.Б. Влияние интенсивной пластической деформации под давлением на структуру, фазовый состав и прочностные свойства нержавеющей хромоникелевых сталей / Н.Б. Эфрос, В.П. Пилогин, Б.М. Эфрос, А.М. Пацелов, Е.Г. Чернышев, Л.В. Лоладзе // *ФТВД*. -2004. -Т.14. -№3. -С.82-89.
- [9] Сэстри, Ш.М.Л. Формирование субмикроструктурной структуры в стали 10Г2ФТ при холодном равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве/ Сэстри Ш.М.Л., Дюбаткин С.В., Сидорова С.В. // *Металлы*. -2004. -№ 2. -С.28.
- [10] Иванов А.М., Петров П.П., Платонов А.А. Влияние равноканального углового прессования и ультразвуковой ударной обработки на ударную вязкость и дефектность стали. Надежность в машиностроении и новые конструкционные материалы.
- [11] Астафурова Е.Г., Захарова Г.Г., Найденкин Е.В. и др. Влияние равноканального углового прессования на структуру и механические свойства низкоуглеродистой стали 10Г2ФТ // *ФММ*. – 2010. – Т. 110. – №3. – С. 275–284.
- [12] Naizabekov A., Lezhnev S., Knapinski M., Kurapov G., Volokitina I.E. Research of influence equal channel angular pressing combined with a heat treatment on the microstructure of the steel 45. 24-th International Conference on metallurgy and materials METAL, Brno, Czech Republic, 2015.

### REFERENCES

- [1] Ivanov K. V., Naydenkin E.V. Structure and properties of mechanical pure aluminum alloy 1420 after exposure to severe plastic deformation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2009, T. 315, No. 2. (in Russ.).
- [2] Nayzabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. Changes in the microstructure and mechanical properties of copper at its deformation in equal channel speed math Ritz. *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2015, №5, S. 12-17. (in Russ.).
- [3] Motyka, M. The influence of initial plastic deformation on microstructure and hot plasticity of  $\alpha+\beta$  titanium alloys. M. Motyka, J. Sieniawski. *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 41, No. 2, P. 95-103 (in Eng.).

- [4] Cheng, S. Cyclic deformation of nanocrystalline and ultrafine-grained nickel. S. Cheng, J. Xie, A.D. Stoica, X.-L. Wang, J.A. Horton, D.W. Brown, H. Choo, P.K. Liaw. *Acta Mater*, **2009**, V.57, P.1272–1280 (in Eng.).
- [5] Sus-Ryszkowska M., Wejrzanowski T., Pakiela Z., Kurzydowski K. *J. Mater. Sci. Eng.* A369, 151 (**2004**) (in Eng.).
- [6] S.S. Hazra, A.A. Gazder, E.V. Pereloma. *Mater. Sci. Eng.* A524, 158 (**2009**) (in Eng.).
- [7] Valiev RZ, Raab GI, M. Yu Murashkin The use of severe plastic deformation to produce bulk nanostructured metals and alloys. *Forging and stamping production*. **2008**, №11, S. 5-12. (in Russ.).
- [8] Efros, N.B. Effect of severe plastic deformation under pressure on structure, phase composition and mechanical properties of stainless chromium-nickel steels. NB Efros, VP Pilyugin, BM Efros and AM Patselov, EG Chernyshev, L. Loshadze. *FTVD*, **2004**, T.14, No. 3, S.82-89. (in Russ.).
- [9] Sestri SH.M.L. Formation submicrocrystalline structure in steel 10G2FT at cold equal-channel angular pressing and subsequent heating. Sestri SH.M.L., Dobatkin SV, SV Sidorov. *Metals*, **2004**, №2, S.28. (in Russ.).
- [10] Ivanov A.M., Petrov P.P., Platonov A.A. Effect of equal channel angular pressing and ultrasonic impact treatment on toughness and defective steel. Reliability in engineering and new construction materials. (in Russ.).
- [11] Astafurova E.G., Zakharova G.G., Naydenkin E.V. et al. Effect of equal channel angular pressing on structure and mechanical properties of low alloy steel 10G2FT. *FMM*, **2010**, T. 110, №3, S. 275-284. (in Russ.).
- [12] Naizabekov A., Lezhnev S., Knapinski M., Kurapov G., Volokitina I.E. Research of influence of equal channel angular pressing combined with a heat treatment on the microstructure of the steel 45. 24-th International Conference on metallurgy and materials *METAL*, Brno, Czech Republic, **2015**. (in Eng.).

## БОЛАТ МАРКАСЫ 35ХМ БКБП ПРОЦЕСІ КЕЗІНДЕ МИКРОҚҰРЫЛЫМ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

А.Б. Найзабеков<sup>1</sup>, С.Н. Лежнев<sup>1</sup>, Г.Г. Курапов<sup>2</sup>, И.Е. Волокитина<sup>2</sup>, Е.П. Орлова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Руднендік индустриалды институты, Рудный қаласы;

<sup>2</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу Университеті, Алматы қаласы

**Түйін сөздер:** микроқұрылым, БКБП, термиялық өңдеуі, болат, феррит, перлит, микроқаттылық, қасиеттер.

**Аннотация.** Берілген жұмыс бірдейканалды сатылы ұяқалыбында БКБ-престеу кезінде субультрақасқтүйірлі құрылымын алуға болат маркасы 35ХМ бастапқы құрылымдық құрылымының зерттеуіне арналған. Берілген зерттеудің бағытын таңдауы бірдейканалды бұрыштық престеу бірқатар циклдар арқылы ультрақасқтүйірлі құрылымымен металл алуды және алдын-ала, соңғы термиялық өңдеуді қолдануының тиімділігін қамтамасыз етеді.

Деформациялаудың 6 циклін жүргізгеннен кейін және алдыңғы термиялық операциядан – изотермиялық босандатудан кейін бірдейканалды сатылы ұяқалыпта болат престеу кезінде түйіршіктің минималды өлшемі 0,7 мкм шегінде болады.

Алынған мәліметтер негізінде болат 35ХМ деформациялаудың алтыншы циклдында алдыңғы босандату жүргізгеннен кейін, қалыпты күйінде ары қарай жоғары босандатудан кейін субультрақасқтүйірлі құрылымын алуға болады, ал сол болатты бастапқы ыстықтай деформациялауда престеу кезінде БКБП-дың сегіз циклдардан кейін ұсақ құрылымын алуы мүмкін емес болады. Осыдан зерттеулер көрсеткендей, БКБП алдында 2-ші ретті босандату және ары-қарай жоғары қалыптандырудан кейін алдын-ала термиялық өңдеуді жүргізгеннен кейін осы алдын-ала өңдеу арқылы субультрақасқтүйірлі құрылымын алуға болады.

Поступила 13.04.2016 г.