

УДК 621.762.4.016(075.8)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВОЙ СТАЛИ ПК Г13

Сообщение 3. Формирование структуры стали ПК Г13 при различных схемах уплотнения

© 2013 г. **Н. Н. Жердицкая, Ж. В. Еремеева**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
Южно-Российский государственный технический университет (ЮРГТУ–НПИ), г. Новочеркасск

Н. Н. Жердицкая – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения ЮРГТУ–НПИ
(346430, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132). Тел.: (86352) 65-353.

Ж. В. Еремеева – докт. техн. наук, доцент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ «МИСиС»
(119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 638-44-09. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Рассмотрено структурообразование порошкового аустенита, полученного при различных схемах уплотнения. Установлено, что при осадке в закрытом штампе и поперечном прессовании формируется устойчивая фрагментированная структура аустенита. Показано, что при горячей штамповке по схемам экструзии и неравноосного всестороннего сжатия обеспечиваются высокие степень и скорость деформации, что приводит к преимущественному развитию динамической и статической рекристаллизации. С увеличением степени деформации по схеме свободной осадки размеры рекристаллизованных зерен уменьшаются.

Ключевые слова: порошковая аустенитная сталь, горячая штамповка, схема уплотнения, структурообразование.

Structure formation of powder austenite produced with different compaction schematic diagrams is considered. It is found the steady fragmented austenite structure to be formed during compression in a closed die and transversal compaction. High degree and rate of deformation are shown to be ensured during hot forming according to the extrusion and non-equiaxial all-around compression resulting in preferential development of dynamic and static recrystallization. In increasing the deformation degree according to the free compaction schematic diagram, the recrystallized grain sizes are reduced.

Key words: powder austenitic steel, hot forming, compaction schematic diagram, and structure formation.

Характер напряженного состояния заготовок при горячей деформации оказывает существенное влияние на структурообразование порошкового материала. Для реализации напряженного состояния при горячей штамповке (ГШ) с разными степенью и направлением деформации исследовали различные схемы уплотнения заготовок, такие как: осадка, всестороннее неравноосное сжатие, экструзия, поперечное прессование, свободная осадка в контейнере. Их применение обеспечивало достаточно широкий диапазон изменяемых параметров ГШ: скорости и степени деформации, распределения напряжений и деформаций в сечениях заготовок.

Для исследования были получены образцы цилиндрической ($d = 20$ мм) и призматической ($10 \times 10 \times 55$ мм) форм методом холодного прессования с последующим спеканием [1], условия которого были одинаковыми: восстановительная среда – осушенный диссоциированный аммиак с темпера-

турой точки росы $t_{т.р} = -20...-30$ °С, $t = 1200 \pm 10$ °С и $\tau = 120$ мин. Процесс ГШ предварительно нагретых образцов ($t_{гш} = 1180 \div 1200$ °С) выполняли на фрикционном молоте или гидравлическом прессе.

Особенности структуры горячештампованного аустенита оценивали по форме и размерам зерен, а также по конфигурации и характеру распределения неметаллических включений и остаточных пор. Средний размер зерен определяли с помощью автоматического структурного анализатора EPIQUANT, измерение микротвердости выполняли на микротвердомере ПТМ-3.

При уплотнении порошковый материал находится в объемном напряженном состоянии, причем усилия и напряжения по всем направлениям неравномерны. Для представления напряженного состояния прессовки при различных схемах уплотнения можно выделить элементарный параллелепипед. Напряженное состояние любой точки деформируемой прессовки может быть

определено 6 компонентами: тремя нормальными ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) и тремя касательными ($\tau_{yx}, \tau_{zy}, \tau_{xz}$) [2]. Если оси координат выбрать таким образом, чтобы на площадках действовали только нормальные напряжения, а касательные были равны нулю, то напряженное состояние может быть установлено по известным нормальным составляющим напряжения – σ_1, σ_2 и σ_3 [3]. Одну из главных осей обычно совмещают с направлением действия силы. Соответственно, схемам главных напряжений можно соотнести схемы главных деформаций ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$).

Осадка. Уплотнение путем осадки в закрытом штампе на прессе осуществлялось со скоростью деформации $\dot{\epsilon} \leq 10 \text{ с}^{-1}$ и степенью $\epsilon = 12 \div 25 \%$, обеспечивающей нормальную работу инструмента. В результате получали высокоплотный материал с остаточной пористостью 1–2 % и однородной по сечению образца структурой. Схемы уплотнения и напряженно-деформированного состояния при осадке представлены на рис. 1.

Схема осадки обеспечивает равномерную и достаточно высокую степень деформации, так как течение материала ограничено размерами внутренней полости матрицы. Степень деформации

$\epsilon = 20 \div 25 \%$ при $t_{\text{гш}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$ и охлаждении на воздухе приводит к формированию устойчивой субструктуры аустенита, что подтверждается линиями скольжения в объемах практически всех зерен (рис. 2). После изотермической выдержки при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 мин еще не наблюдается появление рекристаллизованных зерен, что объясняется протеканием процесса динамического возврата и развитием рекристаллизации на месте в процессе выдержки.

Увеличение скорости деформации до $2,3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ (осадка на молоте) способствует ускоренному развитию рекристаллизации. При $\epsilon = 30 \%$ и охлаждении на воздухе фрагментированные объемы микроструктурным анализом не выявляются.

Всестороннее неравноосное сжатие. Для изучения формирования структуры в условиях, близких к схеме всестороннего неравноосного сжатия, проводили осадку образцов, предварительно помещенных в контейнер (рис. 3).

Нагретый контейнер с образцом переносили в массивную матрицу и осуществляли уплотнение с помощью пуансона, создавая эффект всестороннего неравноосного сжатия. Режим горячей

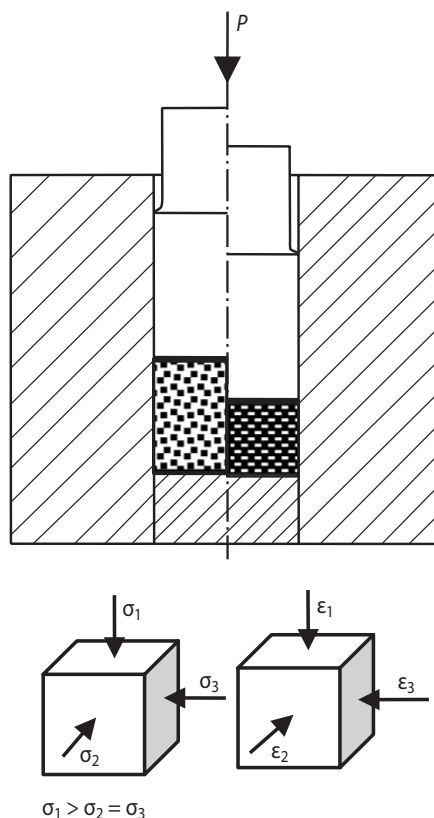


Рис. 1. Схемы напряженно-деформированного состояния при осадке

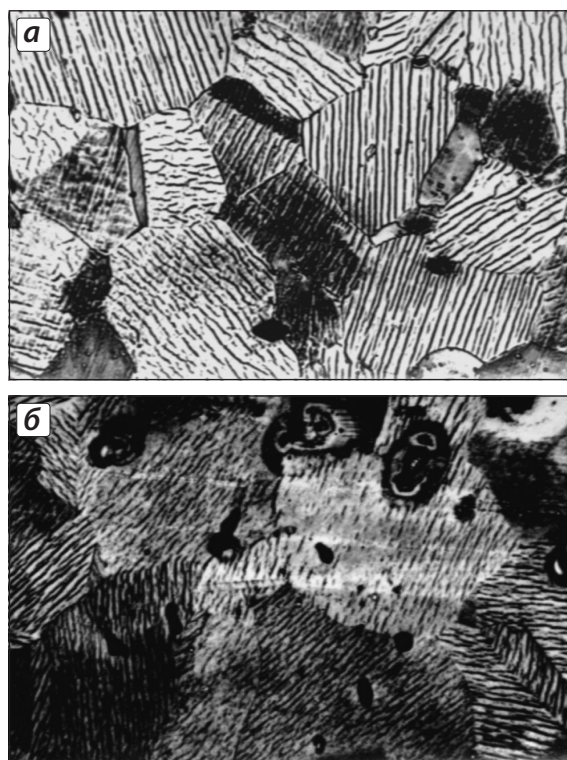


Рис. 2. Структура образцов стали ПК Г13, полученных по схеме осадки ($\times 625$)
 $t_{\text{гш}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $\epsilon = 20 \%$, $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$, время выдержки: а – 0, б – 600 с

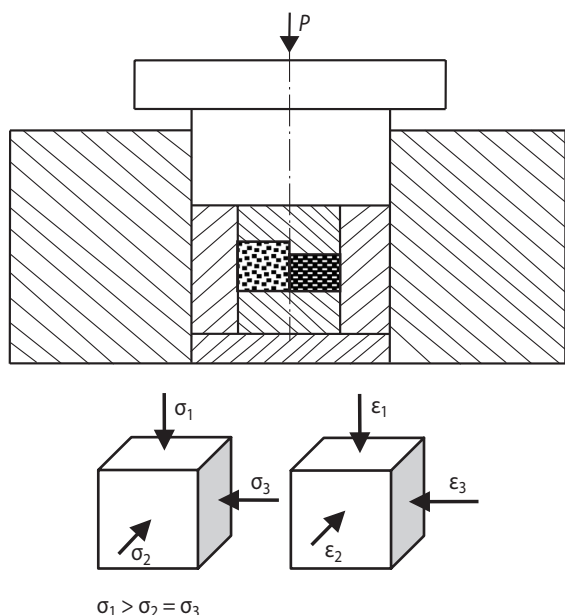


Рис. 3. Схемы уплотнения и напряженно-деформированного состояния при всестороннем неравноосном сжатии

штамповки (осадка на молоте) был следующим: $t_{\text{гш}} = 1200^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 20\%$, $\dot{\varepsilon} = 7,3 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$. После ГШ образцы вместе с контейнером охлаждались на воздухе.

В ходе этого процесса возникают напряжения, приводящие к уплотнению и деформации материала заготовки из-за наличия пористости в прессовке. Структура стали достаточно однородна по объему, размер равноосных зерен составляет 9–15 мкм (рис. 4).

Линий скольжения в объемах зерен не наблюдалось, что может свидетельствовать о завершении рекристаллизации. Процесс разупрочнения, скорее всего, протекает по механизму динамиче-

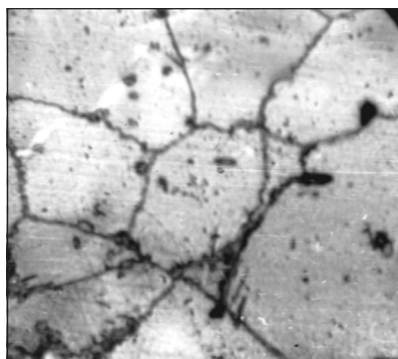


Рис. 4. Структура образца стали ПК Г13, полученного по схеме всестороннего неравноосного сжатия ($\times 625$) $t_{\text{гш}} = 1200^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 7,3 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$, $\varepsilon = 20\%$, охлаждение на воздухе

ской рекристаллизации. Образование зародышей рекристаллизации на исходных границах зерен приводит к локальной миграции отдельных участков большеугловой границы, что выражается характерной зубчатостью границ [4, 5].

Экструзия образцов проводилась в пресс-форме с перепадом диаметров 1:2. При реализации этой схемы была предусмотрена возможность немедленного охлаждения участка экструзии образца выдавливанием через фильеру в охлаждающую жидкость (рис. 5).

Схема экструзии порошковой аустенитной стали обеспечивает высокую степень деформации, которая может достигать 50 %. Ее значение определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\beta_0}{2,0 - 2,8} \varepsilon_{\text{пр}},$$

где β_0 – относительный объем исходной прессовки; $\varepsilon_{\text{пр}} = dF_{\text{ср}}/F_{\text{ср}}$ – степень макродеформации; $F_{\text{ср}}$ – среднестатистическая площадь поперечного сечения прессовки.

Скорость деформации варьировалась от 10 до 100 c^{-1} . При высоких величинах ε и $\dot{\varepsilon}$ облегчаются условия для динамической и последующей статической рекристаллизации в течение изотермических выдержек [4]. Процесс ГШ при $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ c}^{-1}$

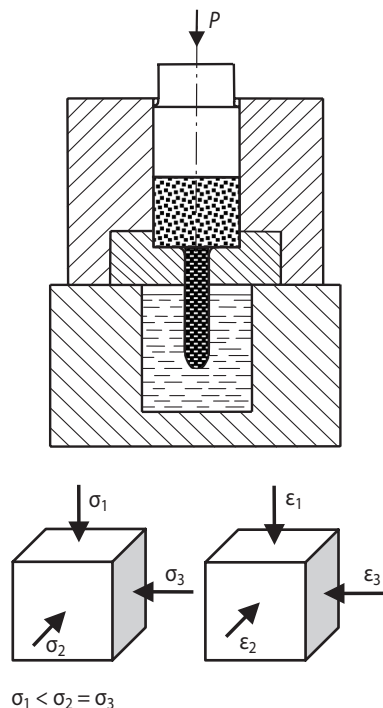


Рис. 5. Схемы уплотнения и напряженно-деформированного состояния при экструзии

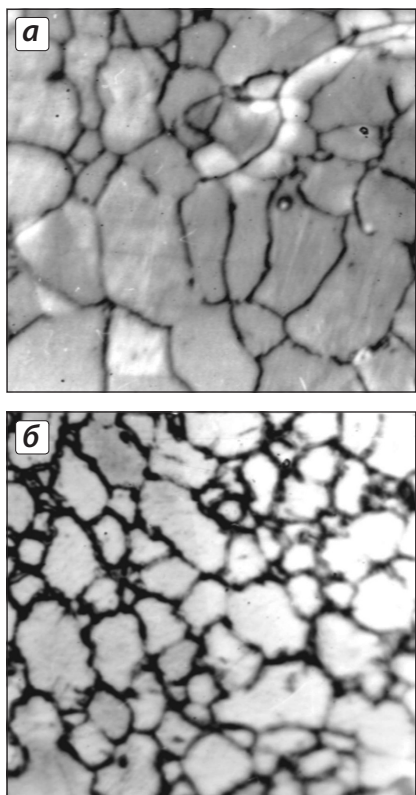


Рис. 6. Структура образца горячештампованной стали ПК Г13, полученного экструзией ($\times 1000$)

$t_{\text{гш}} = 1200^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 50\%$, $\dot{\varepsilon} = 100\text{ с}^{-1}$, охлаждение на воздухе
а – зона экструзии, **б** – зона перехода

и $\varepsilon = 50\%$ приводит к полному завершению первичной рекристаллизации при охлаждении на воздухе (рис. 6).

Структура стали, полученной экструзией, отличается неоднородностью по продольному сечению образца. В ходе ГШ появляется большое число зародышей рекристаллизации, которые растут при медленном охлаждении на воздухе, и в результате образуется мелкозернистая структура. В зоне экструзии форма зерен вытянута в направлении деформации, их размер составляет 10–25 мкм (см. рис. 6, а). Наиболее измельченными областями оказываются зоны перехода от большого диаметра к диаметру участка экструзии; здесь размер зерен в пределах от 3 до 10 мкм (см. рис. 6, б). Высокая степень деформации при медленном охлаждении на воздухе может вызвать критический рост зерна по механизму вторичной рекристаллизации (рис. 7).

Поперечное прессование порошковых спеченных заготовок (рис. 8) проводилось согласно методике, представленной в работе [6], – со скоростью 10 с^{-1} и степенью деформации до 35 %. По-

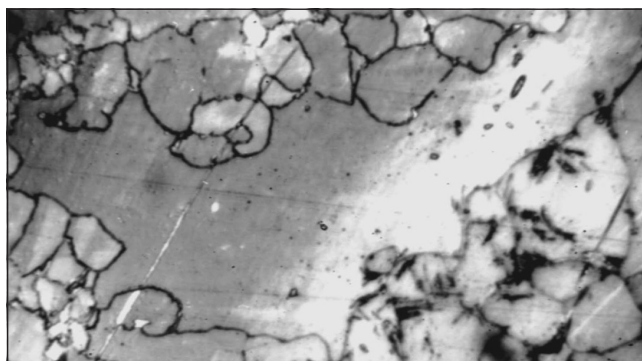


Рис. 7. Критический рост зерна по механизму вторичной рекристаллизации при экструзии ($\times 1000$)

верхность образца, обращенная к движущемуся инструменту, подвергается интенсивной пластической деформации. Структура стали неоднородна по поперечному сечению образца.

Металлографический анализ показал, что в поверхностном слое (формируемом движущимся инструментом) с трудом фиксируются разориентированные объемы, имеются следы внутризеренного скольжения, присутствуют поры различной формы и неметаллические включения (рис. 9, а). Зона поперечного сечения отличается сильно фрагментированными объемами, исходные границы зерен практически не выявляются, видна четкая направленность следов

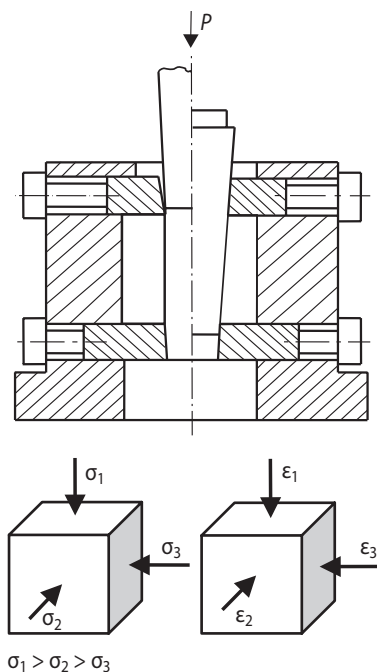


Рис. 8. Схемы уплотнения и напряженно-деформированного состояния при поперечном прессовании

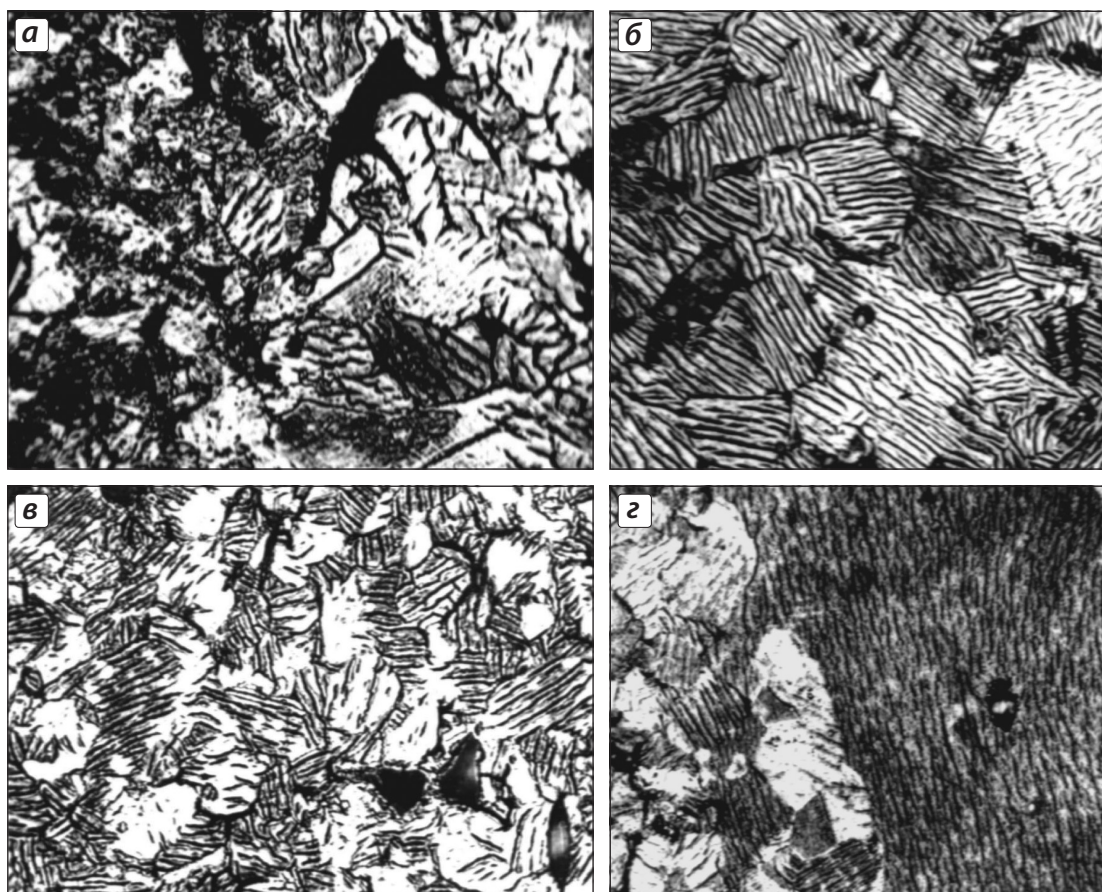


Рис. 9. Структура стали ПК Г13, полученной поперечным горячим прессованием ($\times 1000$)

а – поверхностный слой; **б** – зона четко разориентированных объемов;
в – зона множественного скольжения; **г** – противоположная сторона образца

внутризеренного скольжения (рис. 9, б). Затем идет область множественного скольжения, когда не обнаруживаются не только исходные границы зерен, но и четко разориентированные объемы. Она занимает достаточно большую площадь микрошлифа (рис. 9, в). Ближе к противоположной поверхности образца (со стороны матрицы) вновь появляются мелкие, а затем и крупные фрагментированные объемы (рис. 9, г).

Неоднородность структуры в данном случае объясняется неравномерностью деформации, что связано с условиями напряженного состояния при поперечном горячем прессовании. Сильно фрагментированные объемы, расположенные сразу за поверхностным слоем, обеспечивают высокие показатели износостойкости стали, полученной по данной технологии.

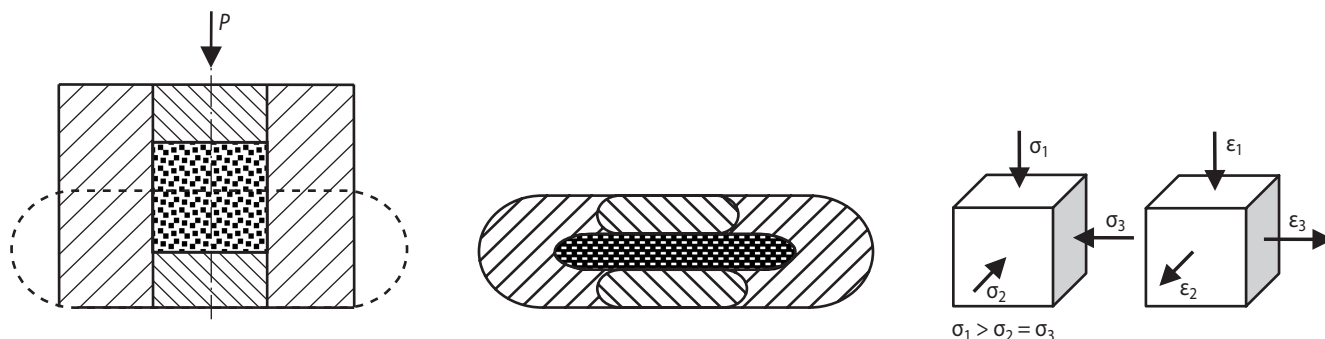


Рис. 10. Схемы напряженно-деформированного состояния при свободной осадке

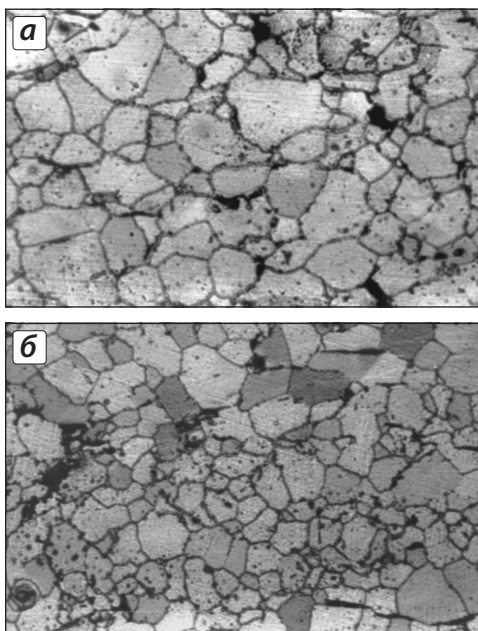


Рис. 11. Структура образцов стали ПК Г13, полученных свободной осадкой ($\times 625$)
 $t_{\text{гш}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 4,4 \cdot 10^2\text{ c}^{-1}$, охлаждение на воздухе,
 $\epsilon = 40\%$ (а) и 52% (б)

Характерной особенностью этой схемы является предпочтительное развитие множественного скольжения, которое не наблюдалось в таком большом объеме ни в одном из рассмотренных вариантов ГШ. При благоприятном режиме ГШ ($t_{\text{гш}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon = 30\%$, $\dot{\epsilon} = 10\text{ c}^{-1}$) развиваются процессы динамического возврата и статической полигонизации при охлаждении на воздухе. Именно этим можно объяснить достаточно высокие показатели износоустойчивости стали, полученной по этой схеме.

Свободная осадка. Для достижения высокой степени деформации проводили свободную горячую осадку образца, помещенного в контейнер (рис. 10). Режим горячей штамповки (осадка на молоте) был следующим: $t_{\text{гш}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 4,4 \cdot 10^2\text{ c}^{-1}$ и $\epsilon = 32 \div 76\%$. Технически обусловленная пауза до охлаждения была увеличена, поскольку образцы, помещенные в контейнер, в воде охлаждались медленнее.

Высокие степень и скорость деформации приводят к полному завершению первичной рекристаллизации после охлаждения на воздухе. Увеличение значения ϵ сильно сказывается на измельчении зерна: при $\epsilon = 40\%$ структура в основном состоит из зерен равноосной формы размером 12–20 мкм, а при $\epsilon = 52\%$ они уменьшаются до 3–6 мкм (рис. 11).

Образование многочисленных зародышей рекристаллизации и их рост в течение деформации и паузы до охлаждения способствуют появлению мелких рекристаллизованных объемов зерен, отличающихся повышенной плотностью дислокаций (микротвердость составляет $H_{0,1} = 300 \div 330\text{ МПа}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены особенности структурообразования порошкового аустенита, полученного при различных схемах уплотнения. При осадке в закрытом штампе и поперечном прессовании формируется устойчивая субструктура аустенита. В случае поперечного прессования материал отличается неоднородной структурой по сечению образца и наибольшей фрагментированностью объемов зерен. Горячая штамповка по схемам экструзии и неравноосного всестороннего сжатия при высоких степени и скорости деформации приводит к преимущественному развитию динамической и статической рекристаллизации. Увеличение степени деформации при уплотнении по варианту свободной осадки обеспечивает формирование мелкозернистой рекристаллизованной структуры аустенита.

Таким образом, использование различных схем уплотнения при варьировании параметров ГШ значительно расширяет возможности формирования структуры порошковых материалов с улучшенными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жердицкая Н. Н., Еремеева Ж. В. // Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. № 4. С. 3–7.
2. Жердицкий Н. Т., Жердицкая Н. Н., Подлозный Н. П. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Композиционные материалы. Техн. науки. 2005. Спец. вып. С. 100.
3. Суворов И. К. Обработка металлов давлением. М.: Высш. шк., 1973.
4. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978.
5. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977.
6. Сергеев С. Н. // Матер. V Всесоюз. науч.-техн. конф. «Горячее прессование в порошковой металлургии». Новочеркасск: НПИ, 1982. С. 25.