

***Рябичева Л. А., Бабич И. Н., Белозир И. И.**
Луганский государственный университет им. В. Даля
*E-mail: ryabic80@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В статье рассмотрено влияние полугорячей деформации на сфероидизацию цементита и механические свойства стали У8А при сжатии. Установлено, что при сжатии одновременно с динамическим возвратом и рекристаллизации происходит сфероидизация цементита, зависящая от температуры и степени деформации. С ростом температуры и степени деформации пластинчатый перлит превращается в зернистый с образованием сфер цементита. С ростом температуры до температур фазового превращения происходит увеличение прочности и пластичности вследствие начала разрушения пластинок и образования сфер. В интервале температур фазового превращения свойства прочности сначала уменьшаются, а затем к концу интервала превращений увеличиваются в результате реализации режима деформации аустенита.

Ключевые слова: микроструктура, механические свойства, сфероидизация, пластинчатый перлит, зернистый перлит, выдавливание, деформационно-термический режим.

Стойкость инструмента для обработки металлов давлением зависит от вида материала, применяемого для его изготовления, и режимов обработки. Углеродистая сталь У8А перлитного класса применяется для изготовления режущих инструментов, деталей с высокой твердостью и износостойкостью. Перлит любой углеродистой стали содержит 0,8 % С. Строение перлита таково, что дисперсные частицы цементита равномерно расположены в ферритной основе [1]. В литой, горячекатаной и ковальной стали присутствует пластинчатый перлит, состоящий из пластинок феррита и цементита. В зависимости от режима отжига можно получить структуру либо зернистого, либо пластинчатого перлита. Изменение структуры влечет за собой изменение механических свойств [2].

Армирующие пластинки цементита в составе зерен перлита существенно повышают механические и эксплуатационные характеристики перлитных сталей. Пластичный перлит является нестабильной структурной составляющей. В процессе длительной эксплуатации различных деталей при повышенных рабочих температурах происходит сфероидизация цементита [3].

Нестабильность пластинчатого перлита прежде всего обусловлена большим запасом свободной энергии пластинок, имеющих развитую поверхность. Наименьшей поверхностной энергией обладает шар, поэтому структурные составляющие металла стремятся принять сферическую форму. Сфероидизация существенно ускоряется с повышением температуры. Освобождающиеся при разложении перлита пластинки феррита сливаются с ферритными зёрнами [4].

Целью работы является исследование влияния полугорячей деформации на сфероидизацию цементита и механические свойства стали У8А при сжатии.

Исследования выполняли на эвтектоидной стали У8А перлитного класса. Химический состав стали У8А: 80 % С, 0,21 % Si, 0,27 % Mn, 0,28 % Cr. Изготавливали образцы для деформирования сжатием диаметром 25 мм и высотой 50 мм.

Отжиг выполняли в вакууме 10^{-3} мм рт. ст. при температуре 750 °С, с выдержкой 2 часа, охлаждением с печью до 300 °С, затем на воздухе. Получена структура пластинчатого перлита.

Сжатие в области температур фазовых превращений 680–740 °С выполняли на

МЕТАЛЛУРГИЯ

испытательной машине Z/D 10/90 максимальным усилием 100 кН при скорости деформации $0,476 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 1 показана установка для сжатия при повышенных температурах. Она состоит из жестко закрепленных и соосных верхнего 1 и нижнего 8 пуансонов, электропечи 7 с нихромовой обмоткой 2 и двух термопар 3, 4.

Температуру в печи и образца контролировали термопарами вольфрам-рений (3, 4) с точностью до $\pm 2^\circ$. Деформирование образца 5 осуществляли верхним (1) и нижним (8) пуансонами, выполненными из стали Р6М5. На их торцах запрессованы вставки 6 из жаропрочного сплава ВК6. Для уменьшения трения между пуансонами и образцом в качестве смазки использовался графит, разбавленный ацетоном. По диаграмме сжатия строили кривые течения в октаэдрических координатах: $\tau_8 - g_8$ [5]. Октаэдрическое напряжение определяли по формуле

$$\tau_8 = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_0 = const,$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения;

σ_0 — предел текучести.

Октаэдрический сдвиг определяли по формуле:

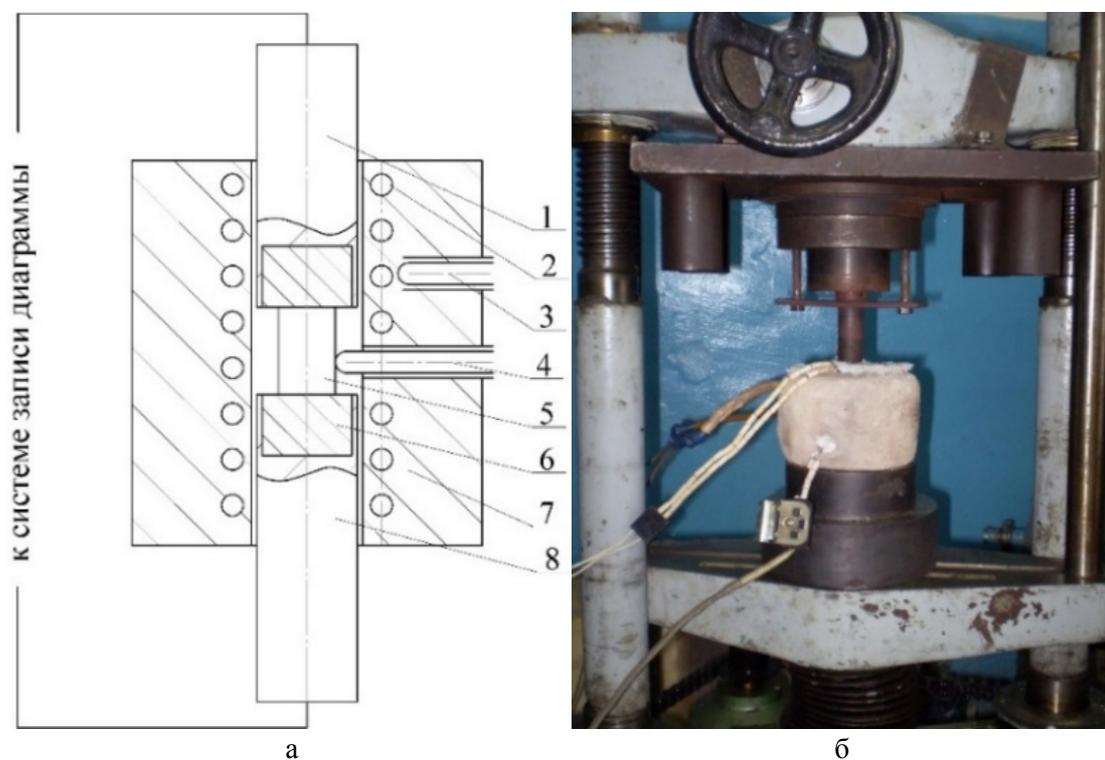
$$g_8 = \sqrt{2} e_i.$$

При обработке диаграмм сжатия учитывали, что

$$e_i = 2 \ln \frac{d_x}{d_0},$$

где d_x, d_0 — начальный диаметр и в каждый данный момент, соответственно.

Микроструктуру изучали на растровом электронном микроскопе РЭММА-102. Механические свойства исследовали путем сжатия образцов, выточенных из деформированных полугорячей деформацией.



а — схема; б — фото

Рисунок 1 — Установка для деформирования при повышенных температурах

На рисунке 2 показана зависимость октаэдрического напряжения от октаэдрического сдвига стали У8А при температурах 680 и 720 °С. Наблюдается резкое возрастание напряжения при степенях деформации 5–10 %, небольшое его изменение до достижения максимального значения при дальнейшем увеличении степени деформации. Выделяются два участка: участок падения напряжения и участок установившегося течения. Установлено, что на начальном участке наряду с упрочнением развиваются процессы динамического разупрочнения, интенсивность которых определяется температурой и степенью деформации [6].

Динамическое разупрочнение происходит за счет процессов возврата, полигонизации, рекристаллизации и сфероидизации цементита. При сжатии происходит перестройка пластинчатой структуры в сфероидизованную [3]. На рисунке 3, а показана микроструктура стали после отжига на пластинчатый перлит, где четко видны его колонии. Следует учитывать, что такую форму цементит принимает, когда аустенит превращается в перлит при температуре фазового превращения. Цементит является очень твердым, но и очень хрупким. После сжатия со степенью деформации 0,32 и температуре 680 °С (рис. 3, б) начинается деформация в виде изгиба и дробление цементитных пластин. С увеличением температуры и степени деформации этот процесс интенсифицируется (рис. 3, в). При температуре 720 °С и степени деформации 1,28 сталь имеет перлитную структуру с изогнутыми сфероиди-

зованными мелкодисперсными частицами цементита с наличием незначительных колоний пластинчатого цементита (рис. 3, г).

Когда цементит из пластинчатого становится сфероидизованным, то механические свойства стали становятся близкими к свойствам матричной фазы. Это дает возможность обрабатывать сталь в интервале фазовых превращений, когда происходит перестройка пластинок цементита.

Выполнены исследования механических свойств стали У8А после полугорячей деформации [7]. Получено, что с возрастанием температуры до 700 °С наблюдается увеличение предела текучести до 950 МПа, что связано с развитием упорядочения субструктуры исходного феррита по механизму динамической полигонизации. Одновременно повышается пластичность деформированного металла: относительная степень деформации по высоте увеличивается до 10 % вследствие развития динамической сфероидизации цементита. Увеличение температуры до 720 °С приводит к падению предела текучести до 650 МПа и пластичности до 7,5 %. При этой температуре усиленно развивается динамическое разупрочнение за счет сфероидизации цементита и полигонизации феррита. Охлаждение такой структуры приводит к большой ее неоднородности, получаемой в результате диффузионного распада. Металл, несмотря на значительную дисперсность микроструктуры вследствие высоких внутренних напряжений между зернами, имеет пониженные прочностные и пластические свойства.

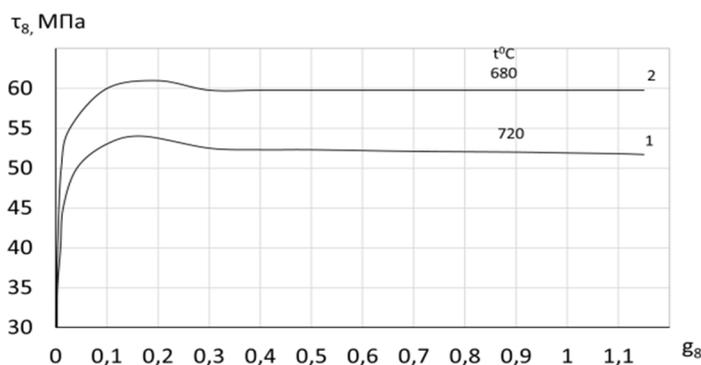
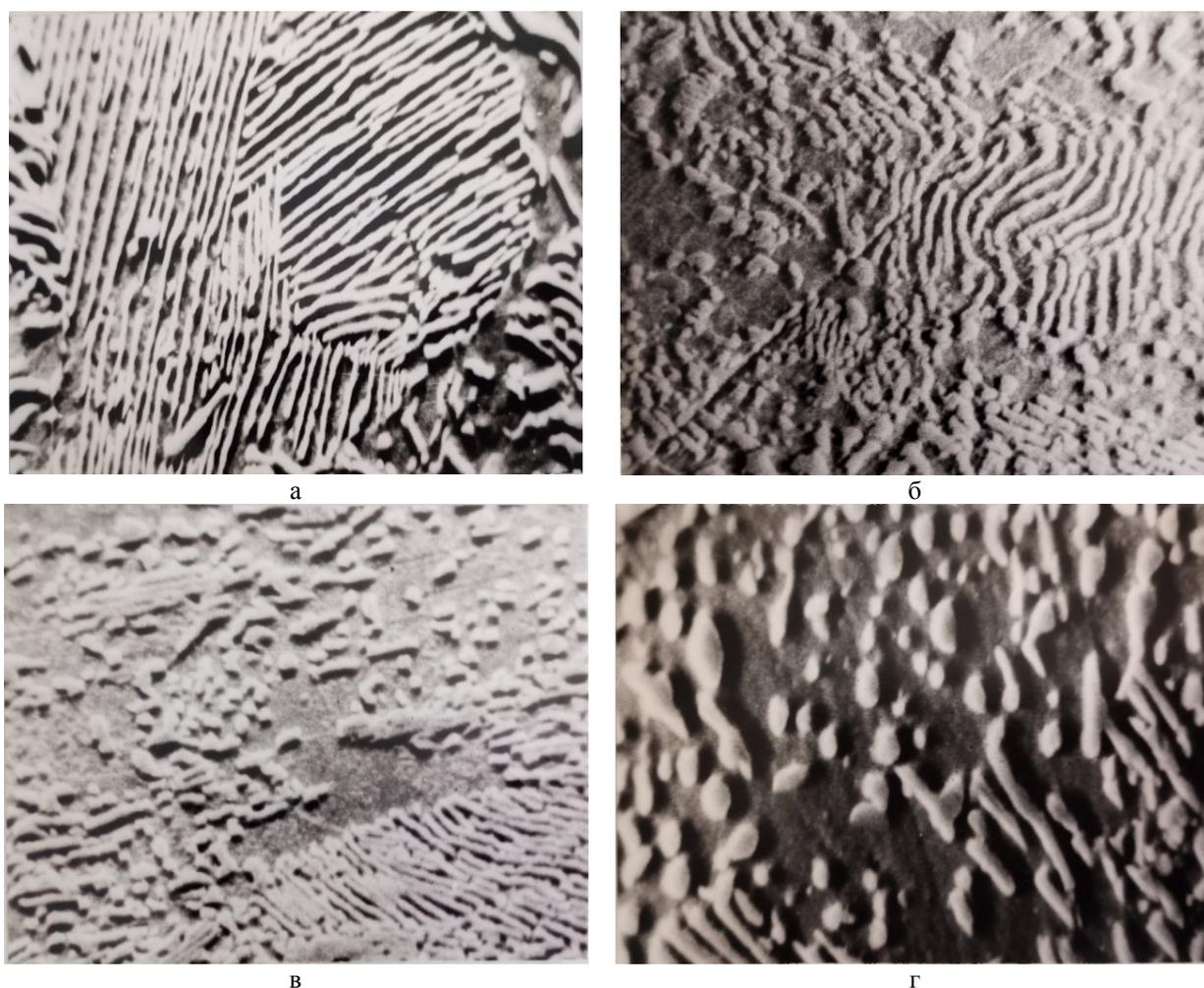


Рисунок 2 — Кривые течения стали У8А, полученные полугорячим сжатием



а — отожженная; б — после сжатия при температуре 680 °С со степенью деформации 0,32;
 в — после сжатия при температуре 720 °С со степенью деформации 0,73;
 г — после сжатия при температуре 720 °С со степенью деформации 1,28×3000

Рисунок 3 — Микроструктура стали У8А после деформации сжатием

Дальнейшее повышение температуры приводит к реализации режима деформации аустенита, образовавшегося в результате фазовой перекристаллизации и претерпевшего возврат и рекристаллизацию. После охлаждения получается структура пластинчатого перлита с частично сфероидизованным цементитом.

Режим полугорячего сжатия использован для штамповки призматических деталей «палец», применяемых для изготовления скребковых конвейеров. Технология изготовления этой детали состоит из операций токарной обработки и фрезерования, которые имеют значительную трудо-

емкость и низкий коэффициент использования металла. Применена точная объемная штамповка полугорячим выдавливанием в разъемных матрицах при температуре 750 °С, при которой протекает процесс сфероидизации цементита. Получена твердость НВ 293–295, что соответствует пределу текучести 580 МПа, пределу прочности 850 МПа. Такая технология позволяет устранить улучшение в результате применяемого деформационно-термического режима.

Изучено изменение микроструктуры и механических свойств при полугорячей деформации сжатием в интервале температур фазовых превращений образцов из стали

У8А. Получено, что при сжатии одновременно с динамическим возвратом и рекристаллизации происходит сфероидизация цементита, что приводит к изменению механических свойств. Установлено, что процесс сфероидизации зависит от температуры и степени деформации. С ростом температуры и степени деформации пластинчатый перлит превращается в зернистый с образованием сфер цементита. Механиче-

ские свойства изменяются неоднозначно. С ростом температуры до температур фазового превращения происходит увеличение прочности и пластичности вследствие начала разрушения пластинок и образования сфер. В интервале температур фазового превращения свойства прочности сначала уменьшаются, а затем к концу интервала превращений увеличиваются в результате реализации режима деформации аустенита.

Список источников

1. Герасимов В. В. Сравнительная морфология сфероидизированной перлитной стали оптическим и электронно-микроскопическим методами // Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 55–59. EDN UYCPUN
2. Долженков И. Е., Долженков И. И. Сфероидизация карбидов в стали. М. : Металлургия, 1984. 143 с.
3. Герасимов В. В. Идентификация новообразования цементита вблизи тройного стыка зерен в сфероидизированной теплоустойчивой перлитной стали // Проблемы энергетики. 2016. № 1–2. EDN TSMSEH
4. Арефьева Л. П., Дука В. В., Дроган Е. Г. Исследование морфологии и топологии пластинчатого и зернистого перлита стали У8 на субмикронном уровне // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. Вып. 15. С. 239–245. DOI: 10.26456/pcascpn/2023.15.239. EDN PVCTZE
5. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М. : Машиностроение, 1971. 424 с. EDN XXLTKN
6. Рябичева Л. А., Лецинская Е. М. Технологические основы термомеханически регламентированных процессов горячей штамповки // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 10–12.
7. Лецинский В. М., Рябичева Л. А. Механические свойства штамповой стали 4Х2В5ФМ после термомеханически регламентированной обработки // Материаловедение. 1997. № 3. С. 28–30.

© Рябичева Л. А., Бабич И. Н., Белозир И. И., 2025

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМД и сварки ЛГУ им. В. Даля Стояновым А. А., к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.

Статья поступила в редакцию 22.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рябичева Людмила Александровна, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия, e-mail: ryabic80@mail.ru

Бабич Ирина Николаевна, доцент каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия

Белозир Ирина Ивановна, старший преподаватель каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия

***Ryabicheva L. A., Babich I. N., Belozir I. N.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, Russia, *e-mail: ryabic80@mail.ru)

EFFECT OF SEMI-HOT DEFORMATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON STEEL

The article considers the influence of semi-hot deformation on the spheroidization of cementite and the mechanical properties of U8A steel under compression. It was found that during compression, the spheroidization of cementite occurs simultaneously with dynamic return and recrystallization, depending on temperature and degree of deformation. With increasing temperature and degree of deformation, the lamellar pearlite transforms into granular pearlite with the formation of cementite spheres. As the temperature rises to the phase transformation temperatures, the strength and plasticity increase due to the onset of lamellar fracture and sphere formation. In the interval of phase transformation temperature, the strength properties first decrease and then increase at the end of the transformation range resulting in realization of the austenite deformation mode.

Key words: microstructure, mechanical properties, spheroidizing, lamellar pearlite, spheroidal pearlite, extrusion, thermomechanical regime.

References

1. Gerasimov V. V. Comparative morphology of spheroidized pearlitic steel by optical and electron-microscopic methods [Sравnitel'naya morfologiya sferoidizirovannoj perlitnoj stali opticheskim i elektronno-mikroskopicheskim metodami]. Power engineering: research, equipment, technology. 2015. No. 7–8. Pp. 55–59. EDN UYCPUN
2. Dolzhenkov I. E., Dolzhenkov I. I. Spheroidization of carbides in steel [Sferoidizaciya karbidov v stali]. M. : Metalurgija, 1984. 143 p.
3. Gerasimov V. V. Identification of cementite new formation near the triple grain junction in spheroidized heat-resistant pearlitic steel [Identifikaciya novoobrazovaniya cementita vblizi trojnogo styka zeren v sferoidizirovannoj teploustojchivoj perlitnoj stali]. Power engineering: research, equipment, technology. 2016. No. 1–2. EDN TSMSEH
4. Aref'eva L. P., Duka V. V., Drogan E. G. Study of morphology and topology of lamellar and granular pearlite of U8 steel at submicron level [Issledovanie morfologii i topologii plastinchatogo i zernistogo perlita stali U8 na submikronnom urovne]. Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. 2023. Iss. 15. Pp. 239–245. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.239. EDN PVCTZE
5. Storozhev M. V., Popov E. A. Theory of metal pressure treatment [Teoriya obrabotki metallov davleniem]. M. : Mashinostroenie, 1971. 424 p. EDN XXLTKN
6. Ryabicheva L. A., Leshchinskaya E. M. Technological bases of thermomechanically regulated hot stamping processes [Tekhnologicheskie osnovy termomekhanicheski reglamentirovannyh processov goryachej shtampovki]. Vestnik mashinostroeniya. 1997. No. 2. Pp. 10–12.
7. Leshchinskiy V. M., Ryabicheva L. A. Mechanical properties of stamp steel 4Cr2W5VMo after thermomechanically regulated treatment [Mekhanicheskie svoystva shtampovoj stali 4H2V5FM posle termomekhanicheski reglamentirovannoj obrabotki]. Material Science. 1997. No. 3. Pp. 28–30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryabicheva Lydmila Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia, e-mail: ryabic80@mail.ru

Babich Irina Nikolayevna, Assistant Professor of the Department of Material Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia

Belozir Irina Nikolayevna, Senior Lecturer of the Department of Materials Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia