

УДК 669.046:539.52

## ГОРЯЧАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТАЛИ 08X21H5T\*

**Темлянец М.В.**, д.т.н., профессор, проректор по научной работе  
и инновациям (uchebni\_otdel@sibsiu.ru)

**Филиппова М.В.**, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения ЕВРАЗ ЗСМК

**Перетьяко В.Н.**, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения ЕВРАЗ ЗСМК

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Приведены результаты исследования неоднородности горячей пластической деформации стали марки 08X21H5T. Растяжение образцов проводили в вакуумной камере испытательной машины ИМАШ-20-75 «Ала-Тоо». Для испытаний образец крепили в вакуумной камере к захватам с помощью планок, к боковой поверхности образца приваривали спай платинародий-платиновой термопары. Откачку воздуха из камеры проводили до остаточного давления  $5,0 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. ( $6,7 \cdot 10^{-3}$  Па). Нагрев образцов до температуры 800 – 1200 °С осуществляли за счет теплового действия пропускаемого через них тока промышленной частоты. Точность поддержания температуры составляла  $\pm 5$  °С. Исследовали деформацию аустенитной и ферритной фаз в зависимости от степени общей деформации стали и температуры, а также данные по влиянию указанных факторов на интенсивность проскальзывания этих фаз по межфазным границам. Исследовано также влияние температуры на отношение «горячей» микротвердости аустенита и  $\delta$ -феррита в стали марки 08X21H5T.

**Ключевые слова:** сталь, деформация, неоднородность, температура, аустенит, феррит, межфазные границы, твердость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-740-743

Сталь марки 08X21H5T аустенитно-ферритного класса широко используется в производстве аппаратуры для химической промышленности. Однако наличие двух фаз с разными механическими свойствами затрудняет ее обработку давлением [1 – 3]. Рассмотрим неоднородность пластической деформации этой стали при ее обработке давлением [4, 5].

Сталь 08X21H5T выплавляли в лабораторной электропечи, разливали в слитки массой 30 кг и проковывали в квадратную заготовку сечением 16×16 мм. Химический состав рассматриваемой стали соответствует ГОСТ 5632 – 72 и приведен ниже:

Элемент	Содержание элемента, %
C	0,08
Mn	0,60
Si	0,50
P	0,022
S	0,005
Cr	20,90
Ni	5,30
Ti	0,35
$\delta$ -феррит	50

Из полученных заготовок изготавливали образцы с рабочей частью 3×3 мм, подготовка для исследования которых заключалась в приготовлении микрошлифов на одной из поверхностей образца и разметке его рабочей зоны с помощью алмазной пирамиды прибора ПМТ-3 для измерения микротвердости (рис. 1). Расстояние между отпечатками алмазной пирамиды составляло 20 мкм. Растяжение образцов проводили в вакуумной камере испытательной машины ИМАШ-20-75 «Ала-Тоо» [7, 8]. Для исследований образец крепили в вакуумной камере к захватам с помощью планок.

К боковой поверхности образца приваривался спай платинародий-платиновой термопары. Откачку воздуха из камеры проводили до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. ( $6,7 \cdot 10^{-3}$  Па). Нагрев образцов до температуры 800 – 1200 °С осуществляли за счет тепло-

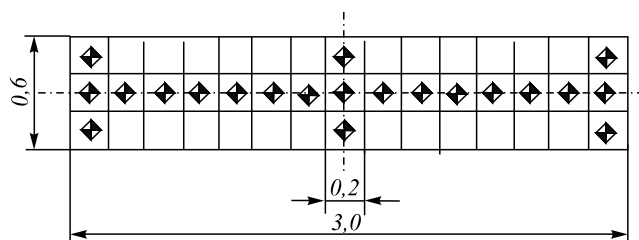


Рис. 1. Разметка рабочей зоны образца

Fig. 1. Marking of the working area of the sample

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ на 2014 – 2015 гг. (гос. контракт № 14-08-00686).

го действия пропускаемого через него тока промышленной частоты. Точность поддержания температуры составляла  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Неоднородность горячей деформации и микротвердость фаз в горячем состоянии («горячую микротвердость») изучали на образцах, прошедших предварительную термическую обработку (нагрев до температуры  $1250^\circ\text{C}$ , время выдержки 0,5 ч, охлаждение в воде), которая позволила получить в стали марки 08X21H5T крупные (примерно 30 мкм) зерна аустенита и  $\delta$ -феррита.

Для исследуемой стали картина горячей деформации может быть проиллюстрирована распределением локальных деформаций вдоль реперных линий. Схемы микроструктур и расположение отпечатков вдоль реперных линий, а также типичные распределения микродеформаций показаны на рис. 2 (внутренние границы фаз не принимаются во внимание). На рис. 2 ферритная фаза заштрихована, аустенитные зерна не заштрихованы. Видно, что механизм горячей деформации двухфазной стали характеризуется постоянством закрепления очагов повышенной и пониженной деформаций, причем последние для отдельных участков намного превышает обычную деформацию. Как правило, такие участки лежат либо в  $\delta$ -феррите, либо через них проходит межфазная граница (рис. 2, участки 4, 8, 10, 13). Аустенит обычно деформирован меньше (рис. 2, участки 1, 3), чем феррит.

Поскольку в отсутствие текстуры зерна поликристаллов ориентированы по-разному по отношению к

приложенной нагрузке, то в отдельных зернах напряжение течения и деформация характеризуются заметной анизотропией. От ориентировки по отношению к приложенной нагрузке и строения межфазных границ зависит величина проскальзывания фаз по ним. Следствием этого является большой интервал значений локальных деформаций для микроучастков каждого типа. Так, например, сталь марки 08X21H5T имеет низкую деформацию на участке 12 в  $\delta$ -феррите (рис. 2). В определенной степени разброс микродеформаций маскирует разницу деформаций аустенита и  $\delta$ -феррита, но, с другой стороны, является характерной деталью картины процесса пластической деформации в поликристаллическом двухфазном материале.

С увеличением (до 30 %) общей деформации растет неоднородность деформации микроучастков каждого типа, что подтверждает вывод о постоянстве очагов повышенной и пониженной деформаций.

В ходе растяжения образцов в вакуумной камере установки высокотемпературной металлографии проводили фотографирование формоизменения координатной сетки при различных степенях деформации.

В направлении растяжения определяли относительную деформацию  $\varepsilon$  микроучастков:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0},$$

где  $l_0$  и  $l$  – расстояние между реперными точками до и после деформации.

Анализировали три группы микроучастков:

- 1 – полностью находятся в зерне аустенита;
- 2 – полностью находятся в зерне  $\delta$ -феррита;
- 3 – через их середину проходит межфазная граница.

Деформация на участках 1 и 2 характеризует соответственно пластическую деформацию в зернах аустенита и  $\delta$ -феррита. Группу микроучастков 3 выделяли для оценки межфазных сдвигов.

Для микроучастков каждого типа проводили статистическую обработку результатов с определением средней деформации  $\bar{\varepsilon}_a$ ,  $\bar{\varepsilon}_\phi$ ,  $\bar{\varepsilon}_{a\phi}$  и среднеквадратичного отклонения  $S$  [9].

Абсолютная погрешность определения деформации микроучастков при доверительной вероятности 0,90 равна в среднем 0,010. При обработке экспериментальных данных определяли величину  $m$ , характеризующую вклад отдельных микроучастков в суммарную деформацию  $\varepsilon$ , по следующим зависимостям:

$$m_a = \frac{\bar{\varepsilon}_a}{\varepsilon}; \quad m_\phi = \frac{\bar{\varepsilon}_\phi}{\varepsilon}; \quad m_{a\phi} = \frac{\bar{\varepsilon}_{a\phi}}{\varepsilon},$$

Неоднородность пластической деформации стали 08X21H5T характеризуется следующими данными:

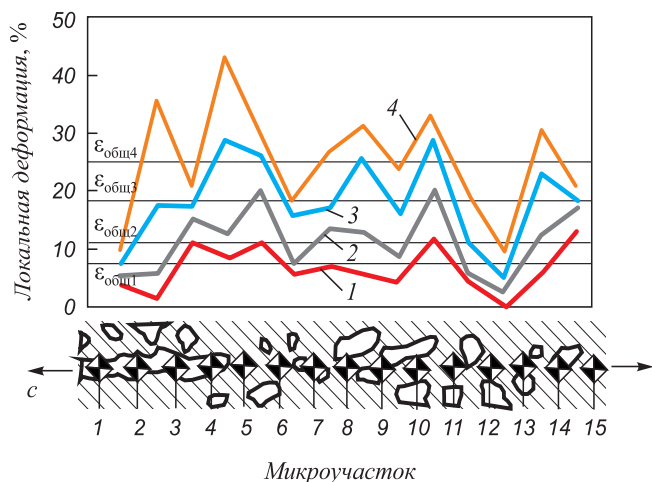


Рис. 2. Схема микроструктуры стали марки 08X21H5T и распределение локальных деформаций вдоль реперной линии в ходе растяжения образца при температуре  $800^\circ\text{C}$  для степеней общей деформации (стрелками указано направление растяжения), %:  
1 – 7; 2 – 11; 3 – 18; 4 – 25

Fig. 2. Microstructure of steel of 08Cr21Ni5Ti brand and the distribution of local deformations along the reference line in the course of the extension of the sample at the temperature of  $800^\circ\text{C}$  for the degrees of common deformations (the pointers show the direction of the extension) at %:  
1 – 7; 2 – 11; 3 – 18; 4 – 25

$T, ^\circ\text{C}$	$m_a$	$m_{\text{аф}}$	$m_\phi$	$m_\phi - m_a$	$m_\phi/m_a$	$m_{\text{аф}} - \frac{m_a + m_\phi}{2}$
700	0,71	0,99	1,12	0,41	1,6	0,08
800	0,55	1,00	1,14	0,59	2,1	0,16
900	0,53	1,04	1,18	0,66	2,2	0,18
1000	0,50	1,10	1,22	0,72	2,4	0,26

Примечание.  $m_a$ ,  $m_{\text{аф}}$  и  $m_\phi$  – относительная доля деформации аустенита, граничных участков и феррита в общей деформации.

Как видно из представленных выше данных, с повышением температуры относительная деформация аустенита уменьшается в 1,42 раза,  $\delta$ -феррита – увеличивается в 1,10 раза; деформация по межфазным границам мало зависит от температуры. Можно также отметить, что при температуре 700 °C  $\delta$ -феррит деформирован в 1,6 раза больше, чем аустенит, а при 1000 °C – в 2,4 раза.

Как было отмечено, в третью группу входили участки, через середину которых проходила межфазная граница. Суммарная деформация таких участков без проскальзывания фаз на границе составит  $(\epsilon_\phi + \epsilon_a)/2$ . Если проскальзывание по границе фаз вносит вклад в деформацию микроучастка, то  $\epsilon_{\text{аф}} > (\epsilon_\phi + \epsilon_a)$ .

В приведенных выше данных в последнем столбце показана величина пластической деформации по межфазной границе  $\delta$ -феррит–аустенит. Как видно из рис. 3, с увеличением температуры возрастает интенсивность сдвигов по границам фаз.

Сопротивление деформации зерен  $\delta$ -феррита и аустенита при температурах 700 – 1000 °C оценивали по величине «горячей» микротвердости  $H_a/H_\phi$  (где  $H_a$  и  $H_\phi$  – микротвердость аустенита и  $\delta$ -феррита соответственно) [10].

Измерение «горячей» микротвердости  $\delta$ -феррита и аустенита проводили на установке ИМАШ-9-66. Полированный образец из стали марки 08X21H5T помещали в вакуумную камеру, из которой откачивали воздух до давления  $6,7 \cdot 10^{-3}$  Па. Нагрев образцов до температуры 700 – 1000 °C осуществляли за счет теплового действия

пропускаемого через них электрического тока промышленной частоты.

На поверхность образца, нагретого до температуры испытания, в местах расположения зерен  $\delta$ -феррита и аустенита наносили по 10 отпечатков индентером, нагрузка на который составляла 0,1 Н. Результаты статистической обработки эксперимента приведены на рис. 4.

Как видно из графика, при высоких температурах микротвердость аустенитных зерен больше, чем  $\delta$ -ферритных. С повышением температуры отношение микротвердостей аустенита и  $\delta$ -феррита растет.

Характер температурной зависимости отношения средних деформаций  $\delta$ -феррита и аустенита аналогичен изменению отношения их «горячих» микротвердостей.

Таким образом, неравномерность горячей деформации по фазам стали марки 08X21H5T обусловлена разностью сопротивления деформации фаз аустенита и  $\delta$ -феррита.

Проскальзывание фаз по высокоугловым границам осуществляется за счет движения зернограницных дислокаций или их комплексов, одна из дислокаций в которых является «сидячей». Увеличение температуры облегчает возврат структуры границ за счет диффузионно-скользящего перемещения зернограницных дислокаций. При этом происходит аннигиляция последних противоположного знака и движением зернограницных дислокаций одного знака к стокам, что вызывает проскальзывание фаз по границам  $\delta$ -феррита и аустенита.

Таким образом, горячая деформация стали марки 08X21H5T неоднородна и характеризуется тем, что  $\delta$ -феррит деформируется сильнее, чем аустенит. Отношение средних деформаций  $\delta$ -феррита и аустенита растет с увеличением температуры и общей деформации образца. Отношение «горячей» микротвердости аустенита и  $\delta$ -феррита также увеличивается с повышением температуры.

**Выводы.** При высоких температурах деформации в стали марки 08X21H5T наблюдается неоднородность деформации, связанная с наличием в структуре материала двух фаз с различными свойствами. Разница

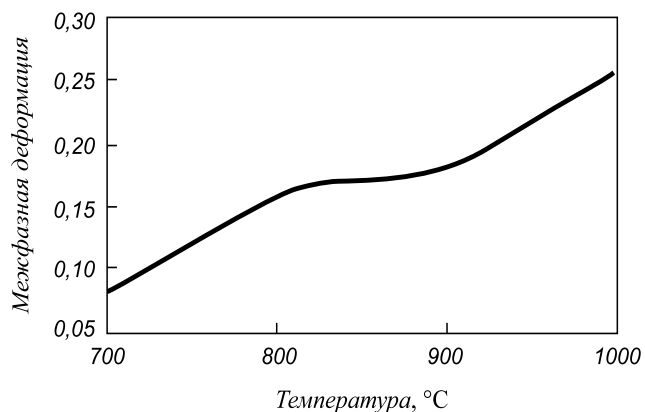


Рис. 3. Межфазная деформация по границе аустенит–феррит

Fig. 3. Interphase deformation along the boundary austenite–ferrite

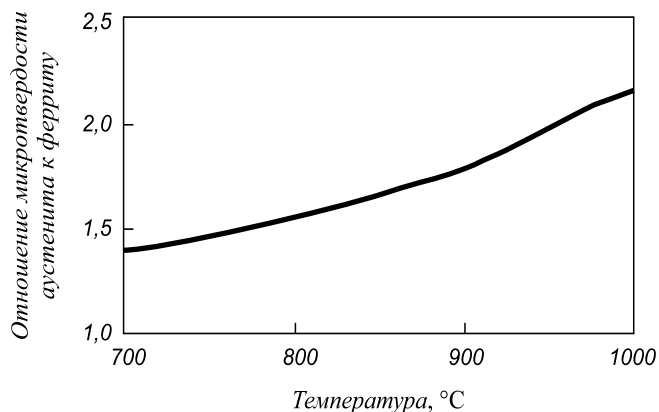


Рис. 4. Отношение микротвердостей аустенита к ферриту

Fig. 4. Microhardness ratio of austenite to ferrite

деформации фаз растет с увеличением температуры и общей степени деформации. Отношение деформации аустенита к общей деформации уменьшается с увеличением температуры. При высоких значениях температуры деформации в стали марки 08X21H5T наблюдается проскальзывание фаз по межфазным границам, деформация по которым мало зависит от температуры. Отношение «горячей» микротвердости аустенита и  $\delta$ -феррита увеличивается с повышением температуры. В стали марки 08X21H5T прочностные свойства аустенита при всех исследованных температурах выше, чем прочностные свойства феррита.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляков Л.Н., Лившиц Б.Г. Дельта-феррит в аустенитно-ферритной нержавеющей стали // Изв. АН СССР. ОТН. Metallurgiya i toplivo. 1961. № 5. С. 90 – 95.
2. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
3. Пуарье Ж.П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел / Пер. с франц. – М.: Metallurgiya, 1982. – 272 с.
4. Гурьев А.В., Теплицкий М.Ш. Микроструктурные особенности сверхпластической деформации технического железа при термодублировании под нагрузкой. – В кн.: Практика тепловой микроскопии. – М.: Наука, 1976. С. 102 – 107.
5. Temlyantsev M.V., Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Kononov S.V. Inhomogeneity of the hot deformation of austenitic steel // Steel in Translation. 2014. Vol. 44, no. 4, pp. 255 – 257.
6. Temlyantsev M.V., Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Kononov S.V. Nonuniformity of 08CR18NI10TI steel hot deformation. – In: External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Russian-China international workshop. – Novokuznetsk, izd. SibSIU, 2014. P. 224 – 230.
7. Лозинский М.Г. Тепловая микроскопия материалов. – М.: Metallurgiya, 1976. – 304 с.
8. Лозинский М.Г., Тананов А.И. Тепловая микроскопия металлических материалов. – М.: Знание, 1973. – 44 с.
9. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
10. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. – М.: изд. МГУ, 1977. – 112 с.

Поступила 24 марта 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 10, pp. 740–743.

### HOT PLASTIC DEFORMATION OF 08Cr21Ni5Ti STEEL

*M.V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal power and Ecology”, Vice-Rector for Research and Innovations (uchebno\_otdel@sibsiu.ru)*

*M.V. Filippova, Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. OJSC “EVRAZ ZSMK”*

*V.N. Peretyat'ko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. OJSC “EVRAZ ZSMK”*

**Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

**Abstract.** The paper presents the research results of the heterogeneity of hot plastic deformation of 08Cr21Ni5Ti steel. Extension of samples was carried out in the vacuum chamber of a testing machine IMASh-20-75 “Ala-Too”. To test the sample it was mounted in the vacuum chamber to the grippers with the help of bars. The junction of platinum – platinum-rhodium couple was welded to the side surface of the sample. The evacuation of air from the chamber was carried out up to a residual pressure of  $5 \cdot 10^{-5}$  mm Mercury ( $6.7 \cdot 10^{-3}$  Pa). Heating of the sample up to 800 – 1200 °C was achieved by the heat from the current of industrial frequency transmitted through it. Accuracy of temperature regulation was  $\pm 5$  °C. The deformation of austenitic and ferritic phases was examined in dependence on the total degree of deformation of steel and temperature, the data about the influence of these factors on the intensity of slip at the interphase boundaries were also considered. The effect of the temperature on the ratio of hot microhardness of austenite and ferrite in 08Cr21Ni5Ti steel was investigated.

**Keywords:** steel, deformation, nonuniformity, temperature, austenite, ferrite, phase boundaries, hardness.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-10-740-743

#### REFERENCES

1. Belyakov L.N., Livshits B.G. Delta-ferrite in austenite-ferritic stainless steel. *Izvestiya AN SSSR. OTN. Metallurgiya i toplivo.* 1961, no. 5, pp. 90–95. (In Russ.).
2. Honeycombe R.W.K. *The plastic deformation of metals.* Edward Arnold Ltd., 2nd ed. 1984, 483 p. (Russ.ed.: Honeycombe R. *Plasticheskaya deformatsiya metallov.* Moscow: Mir, 1972. 408 p.).
3. Gean-Paul Poirier. *Plasticite a haute temperature des solides cristallins.* Paris, 1976 (Russ.ed.: Poirier G.P. *Vysokotemperaturnaya plastichnost' kristallicheskikh tel.* Moscow: Metallurgiya, 1982. 272 p.).
4. Gur'ev A.V., Teplitskii M.Sh. Microstructure peculiarities of superplastic deformation of ingot iron at thermal cycling under loading. In.: *Praktika teplovoi mikroskopii* [Practice of thermal microscopy]. Moscow: Nauka, 1976, pp. 102–107. (In Russ.).
5. Temlyantsev M.V., Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Kononov S.V. Inhomogeneity of the hot deformation of austenitic steel. *Steel in Translation.* 2014, Vol. 44, no. 4, pp. 255–257.
6. Temlyantsev M.V., Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Kononov S.V. Nonuniformity of 08CR18NI10TI steel hot deformation. In.: *External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Russian-China international workshop.* Novokuznetsk: SibGIU, 2014, pp. 224–230.
7. Lozinskii M.G. *Teplovaya mikroskopiya materialov* [Thermal microscopy of the materials]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 304 p. (In Russ.).
8. Lozinskii M.G., Tananov A.I. *Teplovaya mikroskopiya metallicheskih materialov* [Thermal microscopy of metallic materials]. Moscow: Znanie, 1973. 44 p. (In Russ.).
9. Grigorovich V.K. *Tverdost' i mikrotverdost' metallov* [Hardness and micro-hardness of metals]. Moscow: Nauka, 1976. 230 p. (In Russ.).
10. Dedenko L.G., Kerzhentsev V.V. *Matematicheskaya obrabotka i oformlenie rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical treatment and the presentation of the experimental results]. Moscow: MGU, 1977. 112 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by RFBR for 2014 – 2015 (state contract no. 14-08-00686).

Received March 24, 2015