

УДК 669.15-194.2:621.791.01

Чигиринский В. В.
Дья Х.
Кнапински М.
Шейко С. П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

При разработке технологии контролируемой прокатки или термомеханической обработки сталей и сплавов возникает необходимость увязки напряженного состояния пластической среды с термомеханическими параметрами процесса, структурными изменениями в очаге деформации, в конечном счете заданными характеристиками материала. В литературе данному вопросу уделяется недостаточно внимания. Это связано с тем, что не всегда удается описать напряженное состояние металла для пространственного нагружения, адекватно оценить модель пластической среды от термомеханических характеристик процесса. Кроме этого не ясен сам механизм их расчета в зависимости от напряженного состояния и факторов его определяющих.

Постановка задачи. На основе теоретических и экспериментальных исследований определить интегральные характеристики напряженного состояния в точке, далее, с учетом модели Губера-Мизеса установить механические характеристики пластической среды (напряжение текучести), варианты деформационного, температурного и скоростного нагружения. Из предложенных значений термомеханических параметров выбрать из диаграммы рекристаллизации для данной марки стали те, которые соответствуют необходимому структурному состоянию. Это требует проведения не только теоретических исследований, но и экспериментальных, позволяющих выявить закономерности изменения механических характеристик и физических свойств от термомеханических факторов процесса, химического состава стали. Знать влияние термомеханических параметров на структурное состояние пластической среды для конкретной марки стали.

Решение задачи. Рассматривается конкретная новая низколегированная высокопрочная марка стали для изготовления колес грузовых автомобилей 10ХФБТч [1]. В работах [2–4] представлено решение пространственной задачи теории пластичности в аналитическом виде с использованием гармонических функций. В соответствии с работами [2–4] можно записать

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -2 \cdot C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2' \cdot \cos A_2 \Phi_2 - C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3' \cdot \cos A_3 \Phi_3 + C, \\ \sigma_y &= -C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2' \cdot \cos A_2 \Phi_2 - 2 \cdot C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3' \cdot \cos A_3 \Phi_3 + C, \\ \sigma_z &= -3 \cdot C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2' \cdot \cos A_2 \Phi_2 - 3 \cdot C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3' \cdot \cos A_3 \Phi_3 + C, \\ \tau_{yz} &= C_{\sigma 2} \exp \theta_2' \cdot \sin A_2 \Phi_2, \\ \tau_{zx} &= C_{\sigma 3} \exp \theta_3' \cdot \sin A_3 \Phi_3.\end{aligned}\quad (1)$$

Интегральной характеристикой напряженного состояния точки выбирается интенсивность нормальных напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.\quad (2)$$

Подставляя (1) в (2) получим выражение, удобное для проведения анализа

$$\sigma_i = \sqrt{3} \cdot \sqrt{(C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2')^2 + (C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3')^2 +}$$

$$\left. \right) + \left(C_{\sigma_2} \cdot \exp \theta_2' \cos A_2 \Phi_2 \right) \left(C_{\sigma_3} \cdot \exp \theta_3' \cos A_3 \Phi_3 \right). \quad (3)$$

Условие пластической деформации в соответствии с гипотезой Губера-Мизеса

$$\sigma_i = \sigma, \quad (4)$$

где σ – напряжение текучести.

Выражение (4) можно записать в относительных величинах

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_T} = \frac{\sigma}{\sigma_T}, \quad (5)$$

где σ_T – напряжение текучести в ненаклепанном состоянии.

С одной стороны, имеем характеристику напряженного состояния среды, зависящую от коэффициента трения, фактора формы, с другой, физическую величину, определяемую степенью и скоростью деформации, температурой, химическим составом. Таким образом, условие пластичности Губера-Мизеса является звеном, позволяющим установить связь параметров напряженного состояния точки и термомеханических характеристик процесса. Необходимо знать зависимость термомеханических параметров данной марки стали и напряжения текучести. Для получения такой зависимости для нержавеющей марки стали 10ХФБТч были проведены экспериментальные исследования на пластометре Gleeble-3800 (рис. 1), изготовленном фирмой Dynamic Systems, Inc., США [5]. Данные исследования проводились в Польше в Ченстоховской политехнике под руководством проф. Г. Дыя и при участии проф. М. Кнапинского.



Рис. 1. Комплекс Gleeble-3800

Комплекс Gleeble System-3800 предназначен для исследования свойств металлов и сплавов и позволяет моделировать большинство металлургических процессов, включая горячую прокатку. Следует подчеркнуть, что низколегированная высокопрочная марка стали 10ХФБТч не исследована и ее механические характеристики при горячей деформации не известны. Предлагаемые исследования направлены на изучение механических характеристик низколегированной стали.

Рабочий блок (рис. 2) разработан для моделирования ударного нагружения образцов (рис. 3) с высокой точностью по степени и скорости деформации. Специальная конструкция модуля позволяет выполнять многостадийные последовательные нагружения, полностью воспроизводящие режимы деформации практически на любом современном прокатном стане.



Рис. 2. Рабочая камера модуля Hydrowedge

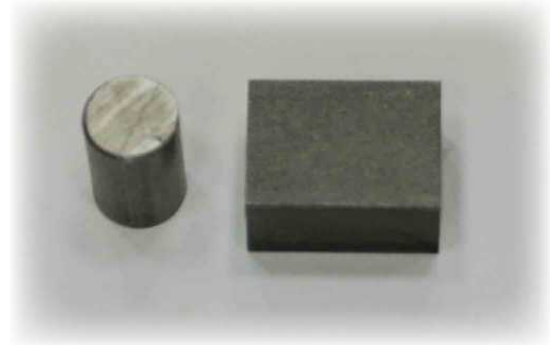


Рис. 3. Типовые образцы для испытаний

Форма записи в формате HDS. Этот формат описания программы испытания разработан специально для работы с модулем Hydrowedge. Данный формат записи обеспечивает программирование параметров процесса в формате, имитирующем программирование работы прокатного стана. Обработка результатов эксперимента осуществляется на стандартном программном обеспечении Origin.

Для обоснования температурного интервала в процессе исследования новой марки стали 10ХФБТч необходимо устанавливались границы фазовых превращений. Для этой цели использовался дилатометр DIL-805A/D (рис. 4) Ченстоховского политехнического университета (Польша). Опытные образцы для исследования на дилатометре показаны на рис. 5.

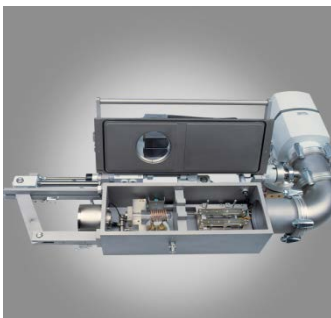


Рис.4. Дилатометр DIL 805A/D



Рис.5. Опытные образцы

На рис. 6. представлены температуры перехода из одного фазового состояния в другое для марки стали 10ХФБТч. Из рис. 6 видно, что в пределах фазы α и фазового перехода ($\alpha + \gamma$) исключается температурный интервал ниже $T = 724^\circ\text{C}$. В эксперименте использована 21 заготовка, размерами $d \times h = 10 \times 12$.

На рис. 7–11 представлены зависимости напряжения текучести σ от деформации ε при разных скоростях деформации для каждой исследуемой температуры.

Величина, оценивающая степень деформации $\varepsilon - \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$.

На рис. 7–15 представлены зависимости напряжения текучести σ от деформации ε при разных температурах для каждой исследуемой скорости деформации.

На рис. 16–17 представлены единичные зависимости напряжения текучести от относительного обжатия при разных скоростях деформации для $T = 700^\circ\text{C}$ и $T = 770^\circ\text{C}$.

В соответствии с проведенными исследованиями для эксперимента выбраны следующие температуры: $T = 800^\circ\text{C}$, $T = 850^\circ\text{C}$, $T = 900^\circ\text{C}$, $T = 950^\circ\text{C}$, $T = 1200^\circ\text{C}$, скорости деформации: $U = 1 \text{ c}^{-1}$, $U = 10 \text{ c}^{-1}$, $U = 100 \text{ c}^{-1}$, $U = 300 \text{ c}^{-1}$.

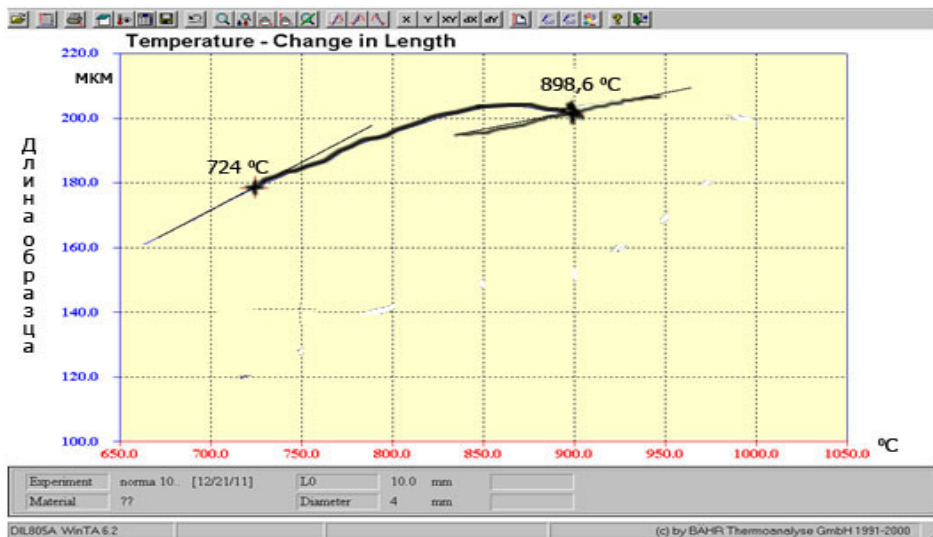


Рис. 6. Границы фазового перехода

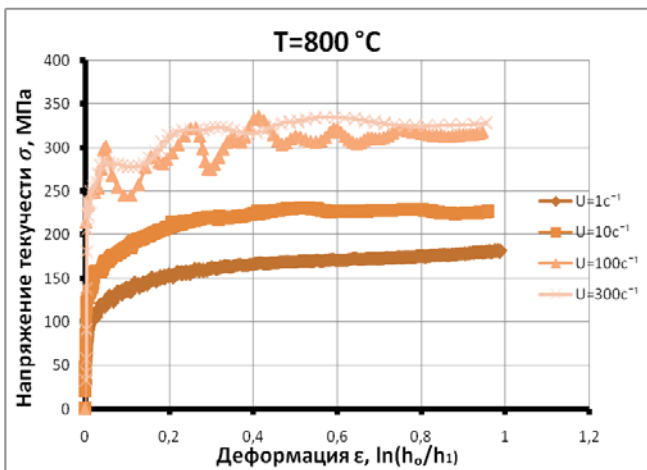


Рис. 7. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 800^{\circ}\text{C}$, $U = 1 \text{ c}^{-1}$, $U = 10 \text{ c}^{-1}$, $U = 100 \text{ c}^{-1}$, $U = 300 \text{ c}^{-1}$

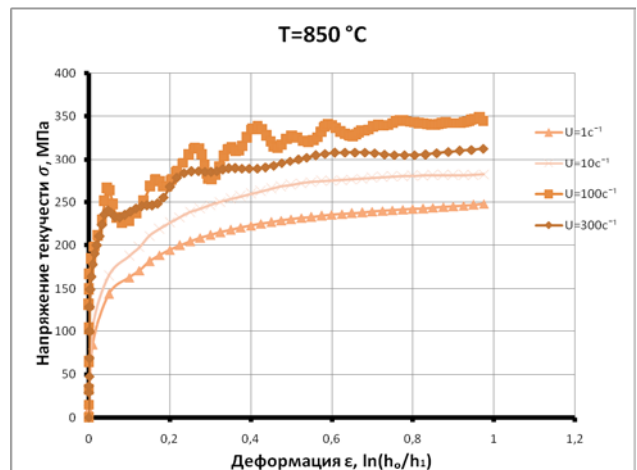


Рис. 8. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 850^{\circ}\text{C}$, $U = 1 \text{ c}^{-1}$, $U = 10 \text{ c}^{-1}$, $U = 100 \text{ c}^{-1}$, $U = 300 \text{ c}^{-1}$

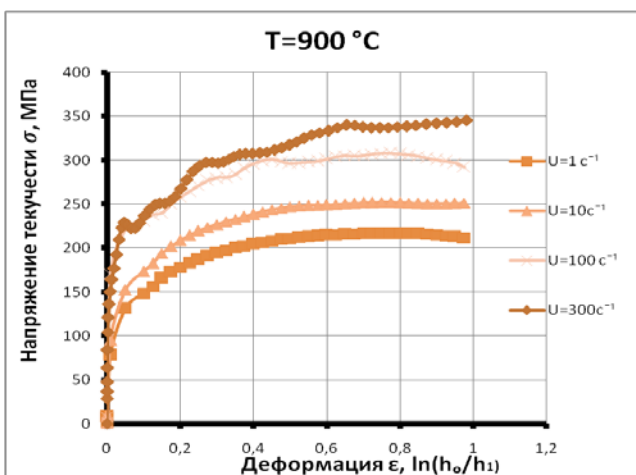


Рис. 9. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 900^{\circ}\text{C}$, $U = 1 \text{ c}^{-1}$, $U = 10 \text{ c}^{-1}$, $U = 100 \text{ c}^{-1}$, $U = 300 \text{ c}^{-1}$

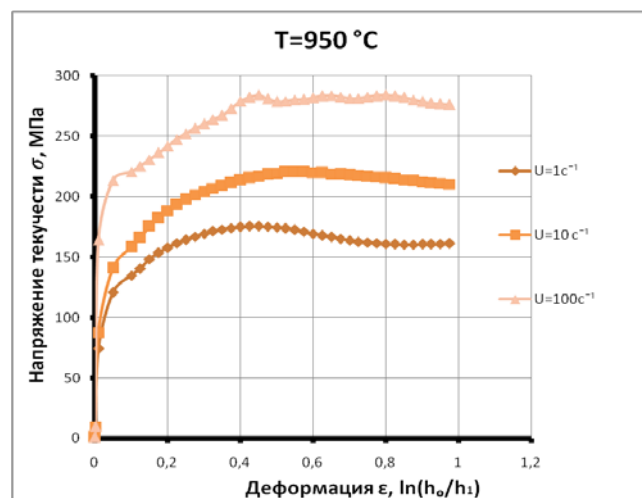


Рис. 10. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 950^{\circ}\text{C}$, $U = 1 \text{ c}^{-1}$, $U = 10 \text{ c}^{-1}$, $U = 100 \text{ c}^{-1}$

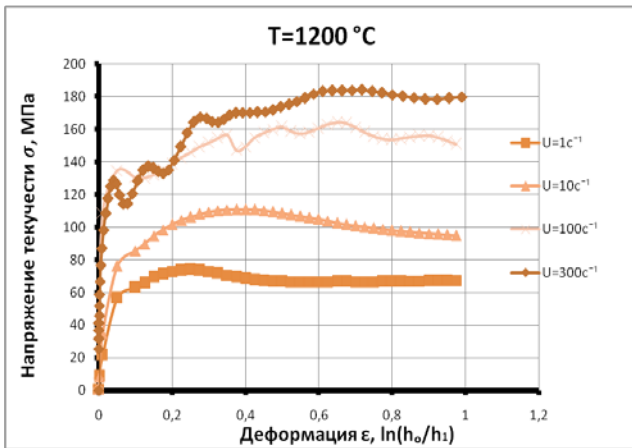


Рис. 11. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 1200^{\circ}\text{C}$, $U = 1\text{c}^{-1}$, $U = 10\text{c}^{-1}$, $U = 100\text{c}^{-1}$, $U = 300\text{c}^{-1}$

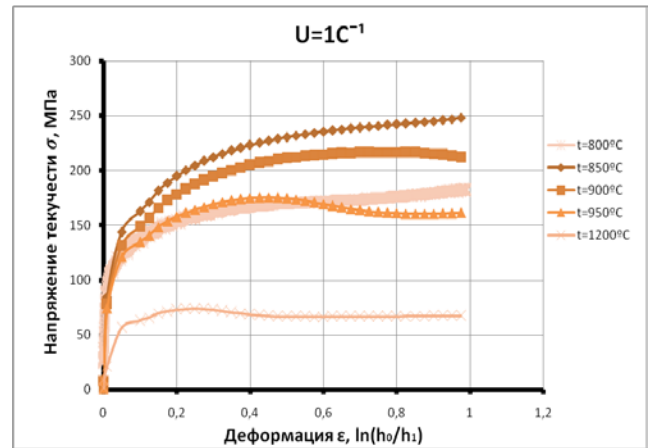


Рис. 12. Зависимость напряжения текучести от деформации при $U = 1\text{c}^{-1}$, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $T = 850^{\circ}\text{C}$, $T = 900^{\circ}\text{C}$, $T = 950^{\circ}\text{C}$, $T = 1200^{\circ}\text{C}$

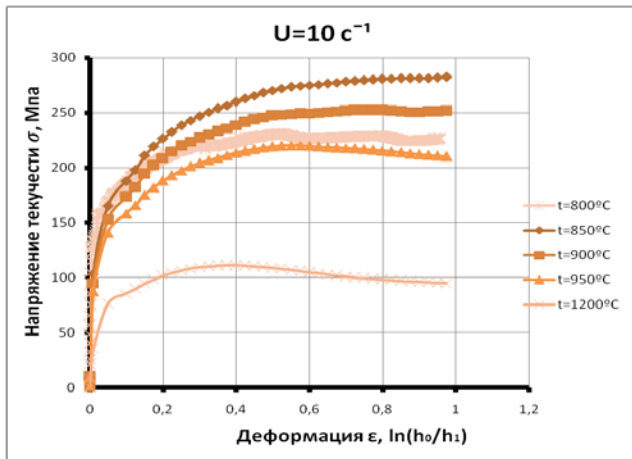


Рис. 13. Зависимость напряжения текучести от деформации при $U = 10\text{c}^{-1}$, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $T = 850^{\circ}\text{C}$, $T = 900^{\circ}\text{C}$, $T = 950^{\circ}\text{C}$, $T = 1200^{\circ}\text{C}$

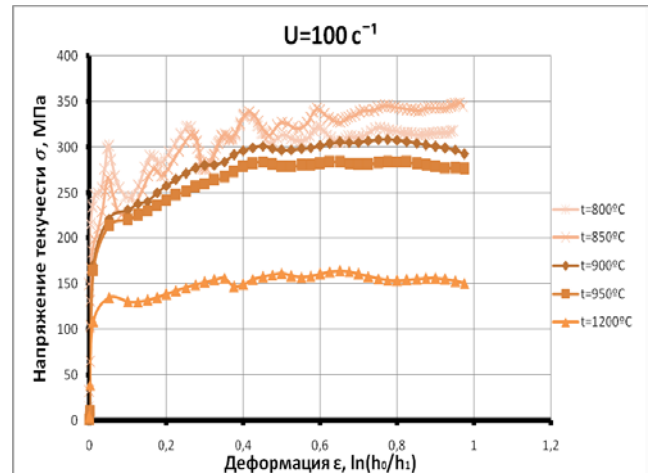


Рис. 14. Зависимость напряжения текучести от деформации при $U = 100\text{c}^{-1}$, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $T = 850^{\circ}\text{C}$, $T = 900^{\circ}\text{C}$, $T = 950^{\circ}\text{C}$, $T = 1200^{\circ}\text{C}$

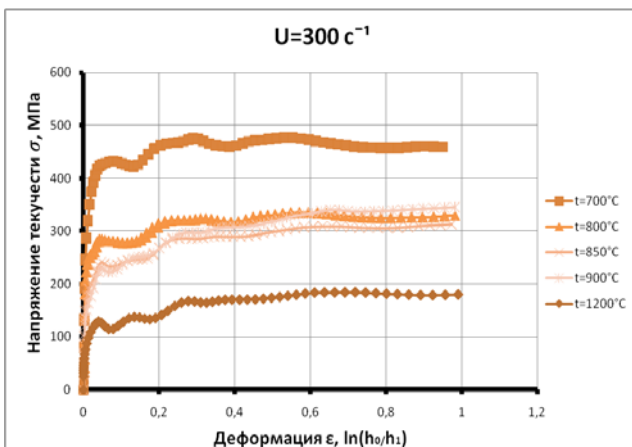


Рис. 15. Зависимость напряжения текучести от деформации при $U = 300\text{c}^{-1}$, $T = 700^{\circ}\text{C}$, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $T = 850^{\circ}\text{C}$, $T = 900^{\circ}\text{C}$, $T = 1200^{\circ}\text{C}$

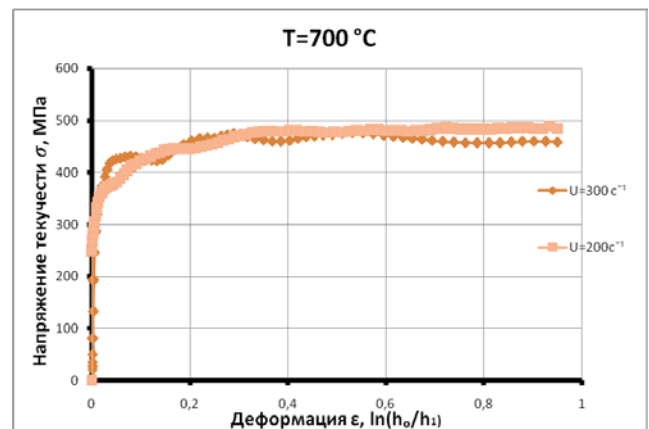


Рис. 16. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 700^{\circ}\text{C}$, для $U = 200\text{c}^{-1}$, $U = 300\text{c}^{-1}$

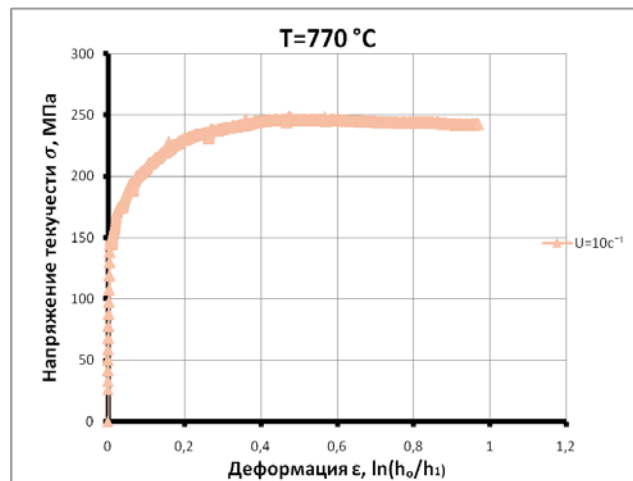


Рис. 17. Зависимость напряжения текучести от деформации при $T = 770^{\circ}\text{C}$, для $U = 10\text{c}^{-1}$

Для полноценного качественного и количественного анализа необходимо получить аналитическую зависимость напряжения текучести от термомеханических параметров процесса, т.е. связь степени, скорости деформации, температуры и сопротивления пластической деформации.

Как показывает анализ, для реального аналитического моделирования пластической среды наиболее приемлемой формулой является зависимость Хензеля–Шпиттеля [3].

Имеем

$$\sigma = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T} \left(\dot{\varepsilon}\right)^{\alpha_6} \left(\dot{\varepsilon}\right)^{\alpha_7 T} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T), \quad (6)$$

где ε , $\dot{\varepsilon}$, T – степень, скорость деформации, температура; α_i – экспериментальные коэффициенты.

Обработав экспериментальные данные (рис. 7–17) для стали 10ХФТБч, в соответствии с программой Reology, были определены коэффициенты α_i выражения (6).

$$\alpha_1 = 0,000082; \alpha_2 = 0,524152; \alpha_3 = -0,000163; \alpha_4 = 1,113630;$$

$$\alpha_5 = -0,003363; \alpha_6 = -0,216846; \alpha_7 = 0,000336; \alpha_8 = 2,970980;$$

$$\alpha_9 = -0,004952.$$

Используя условие пластичности Губера–Мизеса (4), а также выражения (3) и (5) получим:

$$\begin{aligned} & \sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2'\right)^2 + \left(C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3'\right)^2} + \\ & \left) + \left(C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta_2' \cos A_2 \Phi_2\right) \left(C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta_3' \cos A_3 \Phi_3\right) = \\ & = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T} \left(\dot{\varepsilon}\right)^{\alpha_6} \left(\dot{\varepsilon}\right)^{\alpha_7 T} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет связать параметры напряженного состояния точки (коэффициент трения, фактор формы) с термомеханическими параметрами процесса (степень, скорость деформации и температура). Таким образом, появилась аналитическая связь (7), которая на прямую связывает факторы производства и нагружения. Задавая параметры напряженного состояния, при известных коэффициентах α_i , можно определить, используя разные методики расчета, термомеханические параметры процесса.

Постоянные интегрирования $C_{\sigma 2}$ и $C_{\sigma 3}$ определяются граничными условиями

$$C_{\sigma 2} = \frac{k_0}{\exp \theta'_{20} \cdot \cos A_2 \Phi_{20}}, \quad C_{\sigma 3} = \frac{k_0}{\exp \theta'_{30} \cdot \cos A_3 \Phi_{30}},$$

где k_0 – сопротивление пластическому сдвигу в не наклепанном состоянии; $\exp \theta'_{20}$, $\exp \theta'_{30}$, $\cos A_2 \Phi_{20}$, $\cos A_3 \Phi_{30}$ – значения соответствующих функций в очаге деформации для интенсивности напряжений $\sigma_T = 2k_0$. С учетом выражения (5) можно записать

$$\begin{aligned} & \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{\exp(\theta'_2 - \theta'_{20})}{\cos A_2 \Phi_{20}} \right)^2 + \left(\frac{\exp(\theta'_3 - \theta'_{30})}{\cos A_3 \Phi_{30}} \right)^2} + \\ & \left(\frac{\exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \cos A_2 \Phi_{20}}{\cos A_2 \Phi_{20}} \cdot \frac{\exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \cos A_3 \Phi_{30}}{\cos A_3 \Phi_{30}} \right) = \end{aligned} \quad (8)$$

$$= \frac{\alpha_1}{2k_0} \cdot \varepsilon^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \cdot \exp(\alpha_4 \varepsilon) \cdot (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T} \cdot (u)^{\alpha_6} \cdot (u)^{\alpha_7 T} \cdot T^{\alpha_8} \cdot \exp(\alpha_9 \cdot T)$$

На основе экспериментальных данных построена диаграмма рекристаллизации для низколегированной стали 10ХФТБч (рис.18). Из рисунка видно, что размер зерна зависит от тех же термомеханических параметров, что и сопротивление деформации стали (рис. 7–17). Эта общность позволяет связать напряжение текучести с размером зерна, а через условие Губера–Мизеса с напряженным состоянием деформированного металла. Так как напряжения в очаге деформации определяются переменным значением напряжения текучести, что усложняет задачу, следует перейти к относительным характеристикам в условии Губера–Мизеса (5).

Таким образом, связь между теоретическими и экспериментальными данными для конкретной марки стали определяет влияние интегральных характеристик напряженного состояния среды на изменение размера зерна, т.е. структурные превращения для конкретной марки стали.

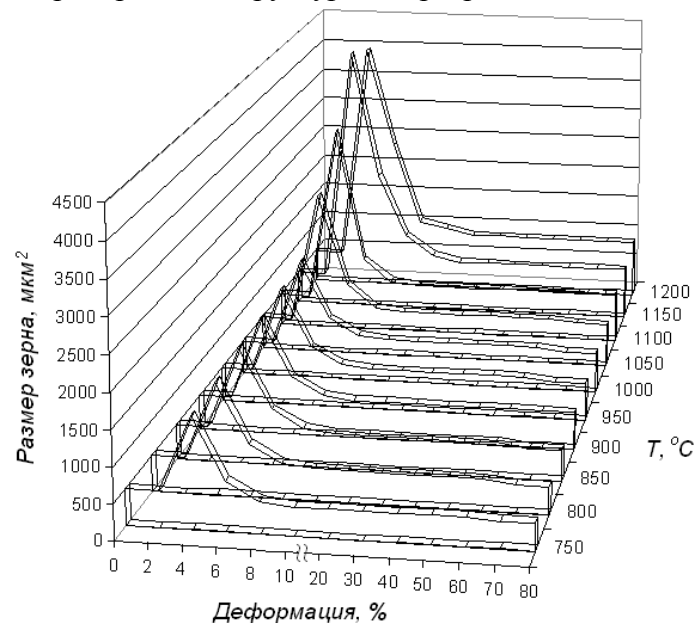


Рис. 18. Диаграмма рекристаллизации стали 10ХФТБч

Представленные результаты позволяют спрогнозировать технологические режимы прокатки в зависимости от характеристик напряженного состояния среды. В конечном счете, получить размер зерна, определяющего прочностные характеристики готового проката, разброс по объему, оптимальную массу готового проката для потребителя.

ВЫВОДЫ

1. На основании представленных исследований получены данные, последовательность использования которых определяет экспериментально-теоретическую связь между характеристиками напряженного состояния металла и структурными превращениями в очаге деформации.

2. Проведены экспериментальные исследования механических характеристик стали 10ХФТБч, структурных изменений при горячей обработке.

2. Экспериментально-теоретический подход позволяет разработать технологические режимы прокатки низколегированной марки стали с использованием сочетания пластической деформации и термической обработки в потоке стана с учетом получения необходимой структуры металла под заказ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 105341 Україна, МПК С22 С38 / 28 (2006.01). Низьколегована сталь / Міщенко В. Г., Бєліков С. Б. [та ін] ; опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.
2. Чигиринский В. В. О новых подходах решения задач теории пластичности / В. В. Чигиринский // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – №1 (20). – С. 41–49.
3. Чигиринский В. В. Новое решение плоской задачи теории пластичности / В. В. Чигиринский // Научные труды ДонНТУ. Серия «Металлургия». – Донецк, 2008. – Выпуск 10 (141). – С. 105–115.
4. Чигиринский В. В. Некоторые особенности теории пластичности применительно к процессам ОМД / В. В. Чигиринский // Теория и технология процессов пластической деформации-96. Материалы научно-технической конференции. – М. : МИСиС, 1997. – С. 568–572.
5. Henzel A. Raschet energosilovykh parametrov v processakh obrabotki metallov davlenijem / A. Henzel, T. Spittel // Metallurgija. – Moskva, 1982. – S. 198.
6. Glowacki M. Analiza podstawowych wzorow empirycznych obliczania parametrów energetyczno-sitowych procesu walcowania w wykrojach / M. Glowacki, S. Mróz, L. Lesik // Hutnik – Wiadomosci Hutnicze. – 1999. – Nr. 11. – S. 523–529.

REFERENCES

1. Pat. 105341 Україна, МПК S22 S38 / 28 (2006.01). Niz'kolegovana stal' / Mishhenko V. G., Belikov S. B. [ta in] ; opubl. 25.04.2014, Bjul. №8.
2. Chigirinskij V. V. O novykh podhodah reshenija zadach teorii plastichnosti / V. V. Chigirinskij // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2009. – №1 (20). – S. 41–49.
3. Chigirinskij V. V. Novoe reshenie ploskoj zadachi teorii plastichnosti / V. V. Chigirinskij // Nauchnye trudy DonNTU. Serija «Metallurgija». – Doneck, 2008. – Vypusk 10 (141). – S. 105–115.
4. Chigirinskij V. V. Nekotorye osobennosti teorii plastichnosti primenitel'no k processam OMD / V. V. Chigirinskij // Teorija i tehnologija processov plasticheskoj deformacii-96. Materialy nauchno-tehnicheskoi konferencii. – M. : MISiS, 1997. – S. 568–572.
5. Henzel A. Raschet energosilovykh parametrov v processakh obrabotki metallov davlenijem / A. Henzel, T. Spittel // Metallurgija. – Moskva, 1982. – S. 198.
6. Glowacki M. Analiza podstawowych wzorow empirycznych obliczania parametrów energetyczno-sitowych procesu walcowania w wykrojach / M. Glowacki, S. Mróz, L. Lesik // Hutnik – Wiadomosci Hutnicze. – 1999. – Nr. 11. – S. 523–529.

Чигиринский В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ЗНТУ;

Дыя Х. – д-р техн. наук, проф. ЧТУ;

Кнапински М. – канд. техн. наук, проф. ЧТУ;

Шейко С. П. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье;

ЧТУ – Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохов, Польша.

E-mail: valerij@zntu.edu.ua