

УДК 621.77.014

Бергеман Г. В.
Соколов С. Ф.
Андреев В. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ-РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

В настоящее время разработка и внедрение в прокатное производство новых перспективных и совершенствование существующих технологических схем производства металлопроката делает актуальной задачу по определению реологических свойств деформируемых материалов [1, 2]. Это связано с тем, что с одной стороны – необходимо управлять конечными свойствами и структурой готового изделия, а с другой – точным определением энергосиловых параметров при деформации.

Также выраженную актуальность подтверждает и тот факт, что все более широкое применение в области разработки и проектирования процессов обработки металлов давлением (ОМД) получило математическое моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Однако общим недостатком всех программ для математического моделирования является недостаточное знание особенностей реологического поведения металлов, в частности, сопротивления деформации.

Сопротивление деформации является важной физической величиной, характеризующей пластическую деформацию металлов и сплавов. Как известно, существенное влияние на сопротивление деформации деформируемых металлов и сплавов оказывают условия их деформации, а, в частности, температура, степень и скорость деформации [3–5]. Если при холодной деформации происходит только упрочнение материала, то при горячей – наряду с упрочнением, в металле интенсивно происходят и процессы разупрочнения. Взаимодействие процессов упрочнения и разупрочнения определяет поведение материала в процессе горячей деформации, существенным образом отражаясь на изменении сопротивления деформации и энергоэффективности процесса деформации. Однако, несмотря на большое количество данных и постоянное совершенствование химического состава материалов, который существенным образом влияет на сопротивление деформации материалов, задача определения реологических параметров имеет большую актуальность.

Целью работы является экспериментальное определение сопротивления деформации для сталей S235JR и 09Г2С, а также стали «М» [6], в процессе одноосного сжатия, а также анализ параметров упрочнения-разупрочнения при горячей обработке давлением.

Для проведения исследований использовались цилиндрические образцы из указанных марок сталей с химическим составом, который приведен в табл. 1–3.

Для достижения указанной цели, в рамках проведения научно-исследовательской работы между ПАО «ЕВРАЗ – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» и кафедрой обработки металлов давлением им. акад. А. П. Чекмарева НМетАУ, проведены совместные исследования реологических характеристик на базе системы физического моделирования Gleeble 3800 (рис. 1) университетов Czestochowa University of Technology (Польша) и Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Таблица 1

Химический состав стали S235JR пс

№ плавки	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %
4547	0,15	0,62	0,006	0,02	0,012	0,03	0,02	0,03

Таблица 2

Химический состав стали 09Г2С

Плавка	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	Al, %	Ti, %
4262	0,12	1,38	0,58	0,023	0,025	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01

Таблица 3

Химический состав стали «М»

C, %	Mn, %	Не более						
0,05-0,12	0,25-0,5	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	N, %
		0,03	0,03	0,03	0,1	0,3	0,3	0,008

Комплекс Gleeble 3800 – это полностью цифровая замкнутая система термомеханических испытаний (рис. 2) [7]. Установка обеспечивает равномерное распределение температуры по всей поверхности образца во время одно- и многократных ударных испытаний. Gleeble 3800 разработан специально для моделирования процессов горячей деформации больших образцов и оснащен сверхмощной механической системой, и высокоскоростными сервоклапанами для быстрого реагирования. Механическая система комплекса состоит из полностью интегрированной сервосистемы, способной развивать усилие до 100 кН на растяжение или сжатие.



Рис. 1. Общий вид установки Gleeble 3800

Согласно разработанному плану исследование проводилось для трех температур $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и трех скоростей деформации $\dot{\varepsilon} = 0,1$; 1 и 10 c^{-1} , что характерно практически для всего диапазона условий традиционных процессов пластической деформации, в частности, процесса прокатки. Перед деформацией образцы нагревались по следующему режиму: нагрев со скоростью $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ → выдержка 60 c → охлаждение до температуры испытаний со скоростью $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ → выдержка 5 c → сжатие при температуре испытаний со скоростью $0,1$, 1 , 10 c^{-1} и логарифмической деформацией до 1 .

В результате были получены кривые влияния истинной деформации на сопротивление деформации (кривые упрочнения) для выбранного сплава (рис. 2–4).

Для дальнейших теоретических исследований (математического моделирования) предполагается использование модели, в которой используется уравнение Хензеля-Шпиттеля для расчета напряжения текучести материала [8]:

$$\sigma_T = A e^{a_1 T} T^{a_9} \varepsilon^{a_2} e^{a_4/\varepsilon} (1 + \varepsilon)^{a_5 T} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \varepsilon^{a_8 T}, \quad (1)$$

где σ_T – напряжение текучести; ε – интенсивность деформации; $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скорости деформации; T – температура, $A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_7, a_8, a_9$ – коэффициенты регрессии.

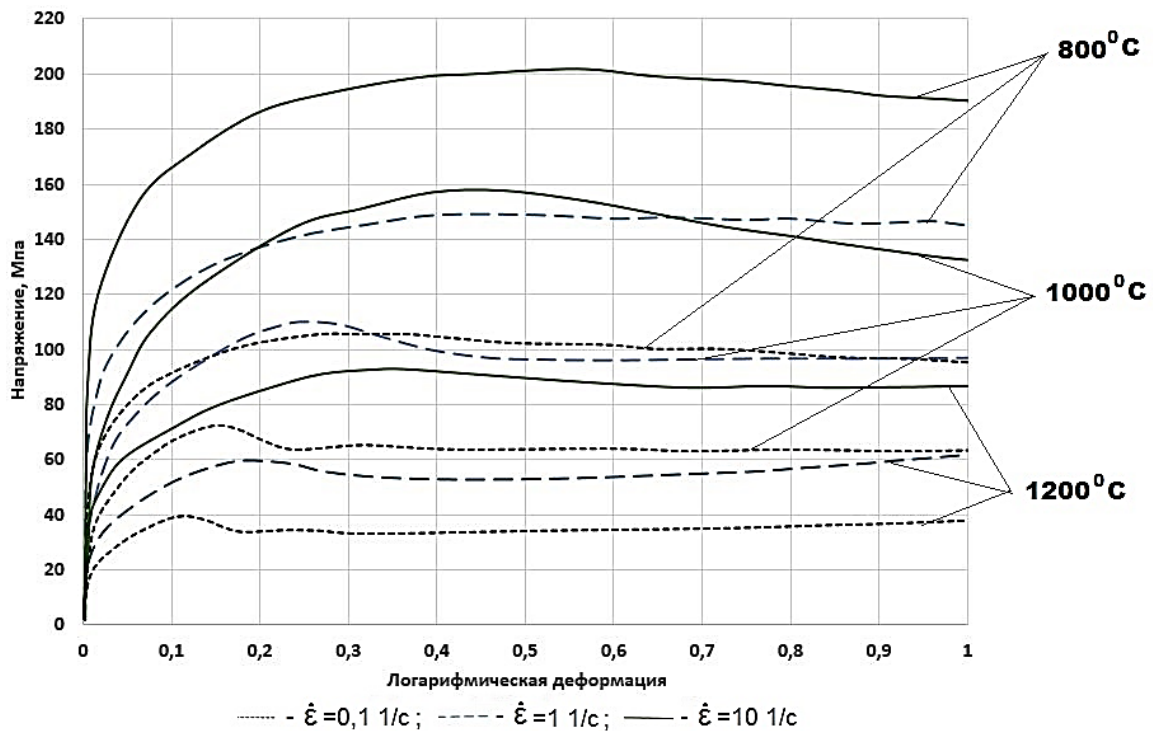


Рис. 2. Кривые упрочнения для стали S235JR пс

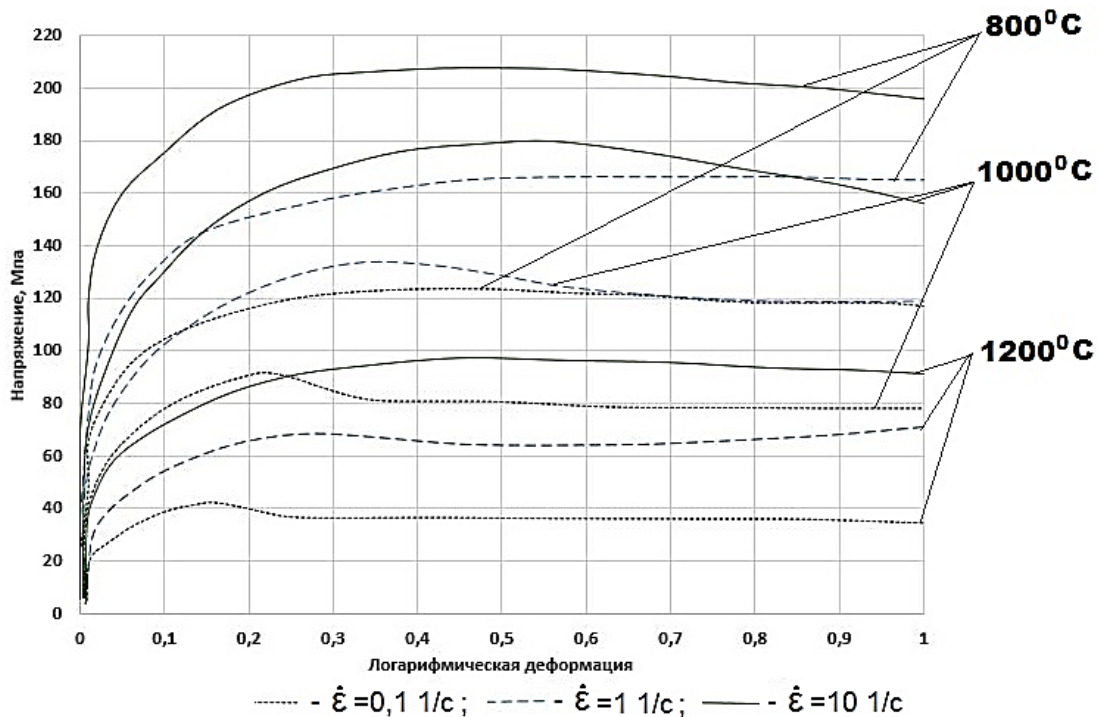


Рис. 3. Кривые упрочнения для стали 09Г2С

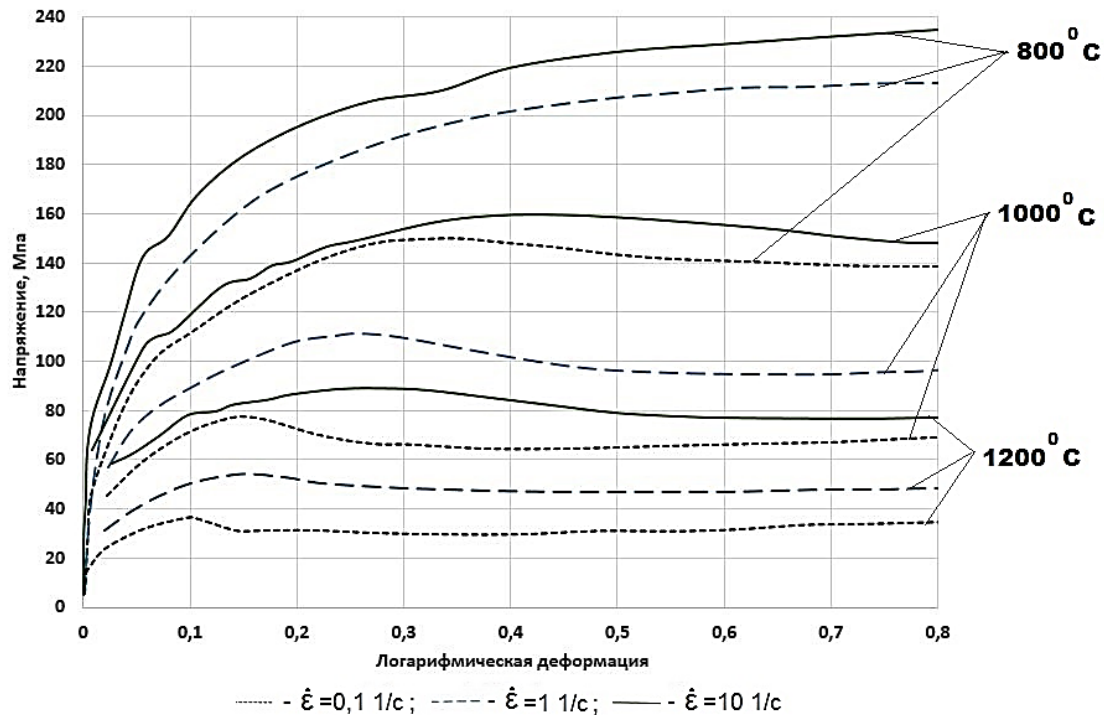


Рис. 4. Кривые упрочнения для стали «М»

Полученные кривые (рис. 2–4) были аппроксимированы при помощи статистического анализа. В результате чего определены коэффициенты регрессии (табл. 4), используемые в уравнении (1) и необходимые для последующего математического моделирования процесса сортовой прокатки профилей.

Таблица 4

Коэффициенты регрессии исследуемых сплавов

Сплав (плавка)	A_1	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
S235JR	1.32	0.007	0.319	0.039	0.002	-0.001	0	0.343	0.0001	5.808
09Г2С	3.43	-0.015	0.696	0.039	0.0005	-0.0006	0	-1.18	7.879	12.18
«М»	2339	-0,002	0,331	-0,104	0,0002	-0,0023	0	0,818	0,0003	-0,02

С целью определения благоприятного, с точки зрения энергосиловых параметров процесса, температурного интервала деформирования выбранных для исследований сталей, воспользуемся методикой упрочнения-разупрочнения [9]. Согласно данной методике оценка интенсивности упрочнения-разупрочнения металлов разной реологии оценивается при помощи коэффициентов (2) и (3), соответственно.

$$K_y = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_0}{\sigma_{\max}} / (\varepsilon_{x1} - \varepsilon_0); \quad (2)$$

$$K_p = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_2}{\sigma_{\max}} / (\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}); \quad (3)$$

где σ_0 – сопротивление деформации при малых значениях деформации; σ_{\max} и σ_2 – значения сопротивления деформации при $\varepsilon = \varepsilon_{x1}$ и $\varepsilon = \varepsilon_{x2}$ соответственно.

На рис. 5–7 приведен графический анализ указанных параметров упрочнения-разупрочнения. Из рис. 5 следует, что процессы разупрочнения для стали S235JR зависят от температуры значительно меньше, чем процессы упрочнения. Исключением может выступать лишь деформация при скорости $0,1 \text{ с}^{-1}$, для которой степень разупрочнения находится почти на уровне упрочнения при скорости деформации 10 с^{-1} .

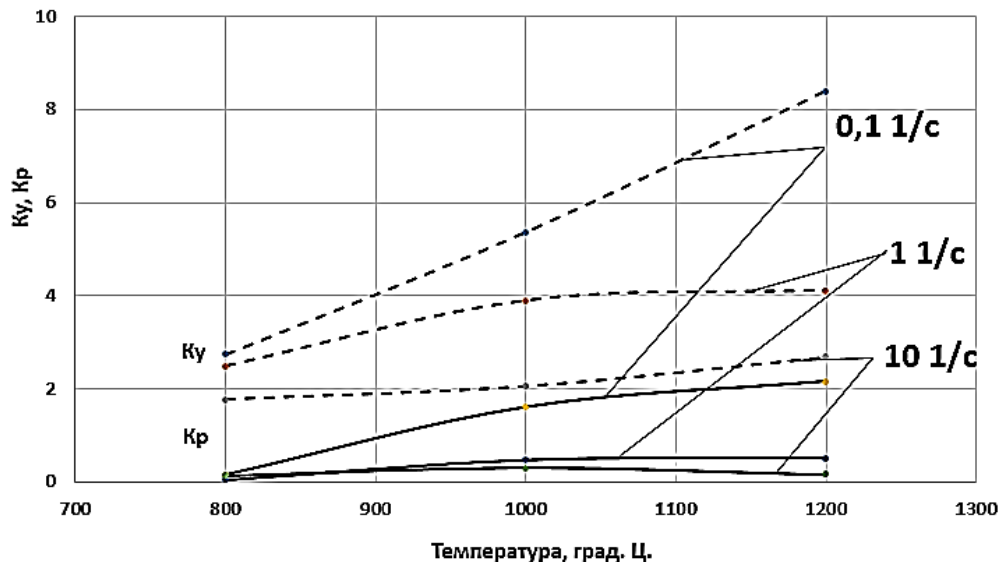


Рис. 5. Зависимости интенсивности упрочнения (K_y) и разупрочнения (K_p) для стали S235JR

С повышением температуры от 1000 °С до 1200 °С и скоростей деформации 1 с^{-1} и 10 с^{-1} коэффициенты упрочнения незначительно возрастают в сравнении с температурами 800–1000 °С, при которых происходит существенное их возрастание. Использование низкой скорости деформации ($0,1 \text{ с}^{-1}$) приводит к существенному возрастанию интенсивности упрочнения во всем интервале температур. Из анализа следует, что температура в диапазоне 1000–1100 °С при скорости деформации 1 с^{-1} является наиболее благоприятной для деформирования стали S235JR.

Из рис. 6 видно, что, как и для стали S235JR, условия упрочнения-разупрочнения стали 09Г2С практически одинаковы. Однако подробный анализ позволяет установить, что для стали 09Г2С наиболее благоприятной, с точки зрения энергоэффективности процесса, является повышенная скорость деформации при прочих равных условиях.

Так, например, при температуре 1000 °С разница между суммой коэффициентов упрочнения-разупрочнения для скоростей 1 с^{-1} и 10 с^{-1} составляет $\approx 19\%$ (в сторону снижения эффектов упрочнения), а при температуре 1000 °С $\approx 32\%$ (в сторону увеличения эффектов упрочнения). Из этого следует, что для стали марки 09Г2С наиболее предпочтительными являются режимы деформации при скоростях деформации не менее 10 с^{-1} и температурах 1000–1100 °С.

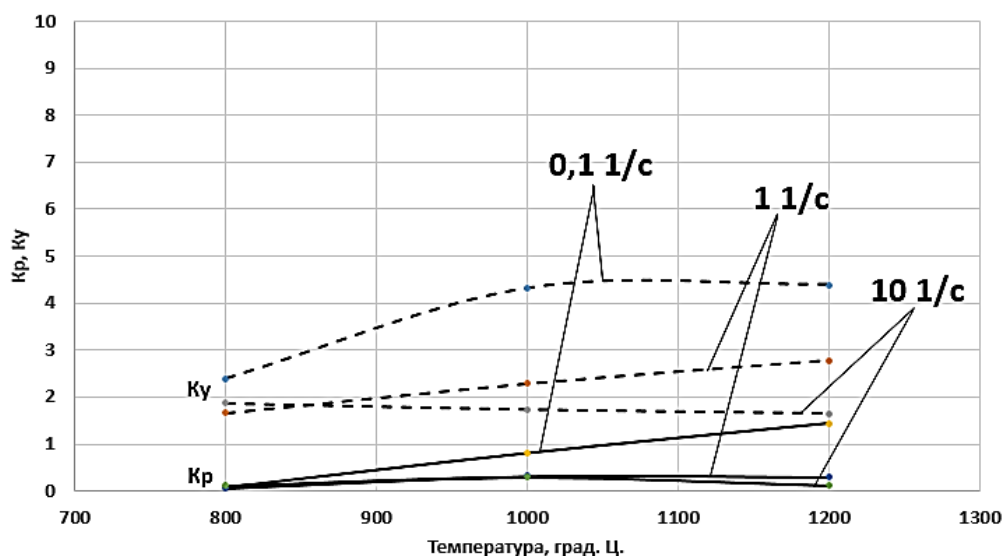


Рис. 6. Зависимости интенсивности упрочнения (K_y) и разупрочнения (K_p) для стали 09Г2С

Как и для стали 09Г2С, сталь марки «М» имеет подобный характер протекания процессов упрочнения-разупрочнения (рис. 7). Основным отличием являются лишь температурно-скоростные параметры процесса, анализ которых позволяет установить, что для достижения наибольшей энергоэффективности процесса деформации необходимо использование: либо низких скоростей деформации и температур ($0,1 \text{ с}^{-1}$ и 1000 °C), либо высоких скоростей деформаций и температур (10 с^{-1} и 1200 °C), что в свою очередь, позволяет осуществлять процесс деформации при практически равных условиях. Так, для увеличения абсолютной скорости деформации ($\geq 10 \text{ с}^{-1}$) необходимым условием, с точки зрения энергоэффективности процесса, является использование температур металла на уровне $1150\text{--}1200 \text{ °C}$.

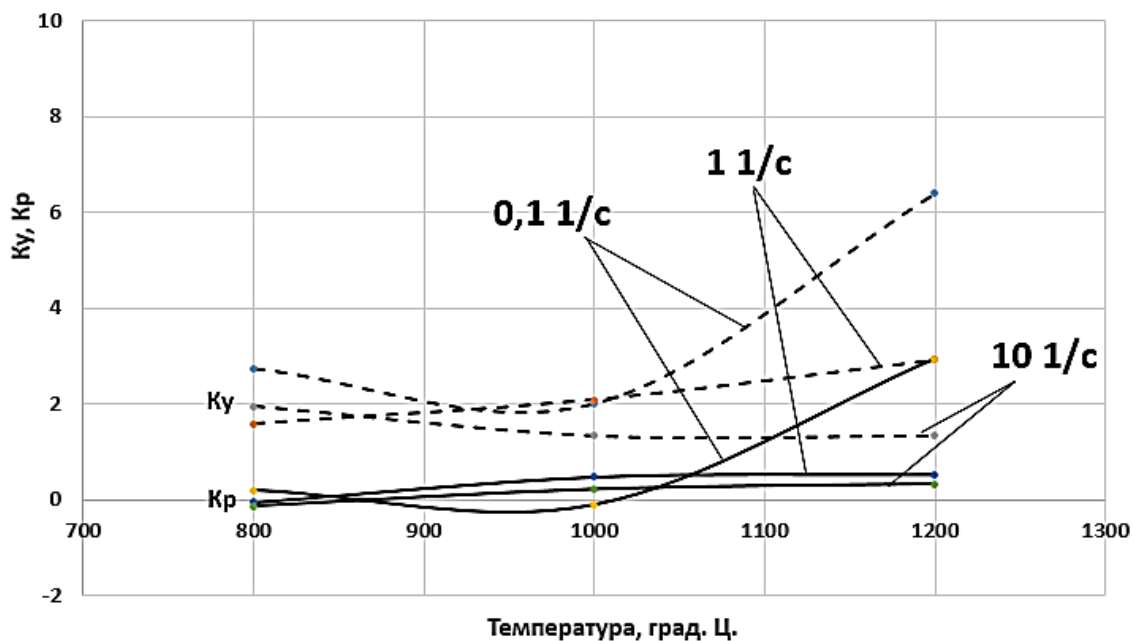


Рис. 7. Зависимости интенсивности упрочнения (K_y) и разупрочнения (K_p) для стали «М»

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальным путем с использованием установки Gleeble определены кривые упрочнения для сталей марок S235JR, 09Г2С и «М» при температурах деформации 800 °C , 1000 °C и 1200 °C ; скоростях деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$, 1 с^{-1} , 10 с^{-1} , которые характерны практически для всего диапазона условий традиционных процессов пластической деформации, в частности, процесса прокатки.

2. Определены коэффициенты регрессии уравнения Хензеля-Шпиттеля, необходимые для дальнейших теоретических исследований в области обработки давлением.

3. На основе экспериментально определенных кривых упрочнения сталей S235JR, 09Г2С и стали «М», а также с применением методики оценки параметров упрочнения-разупрочнения определены предпочтительные, с точки зрения энергоэффективности, температурно-скоростные параметры процесса деформации, а именно:

- сталь S235JR: $T = 1000\text{--}1100 \text{ °C}$; $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$;
- сталь 09Г2С: $T = 1000\text{--}1100 \text{ °C}$; $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$;
- сталь «М»: $T = 1150\text{--}1200 \text{ °C}$; $\dot{\epsilon} \geq 10 \text{ с}^{-1}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров В. Л. *Механика обработки металлов давлением* / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
2. Шломчак Г. Г. *Реологическая концепция в теории прокатки металлов* / Г. Г. Шломчак // *Теория и практика металлургии*. – 2005. – № 3 (52). – С. 39–43.
3. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.

4. Третьяков А. В. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением* / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – 2-е изд. – М. : *Металлургия*, 1973. – 224 с.
5. Клименко П. Л. *Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации : монография* / П. Л. Клименко. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 187 с.
6. Рельсы контактные метрополитена для подведения электрического тока к вагонам метрополитена. *Технические условия: ТУ У 27.1 – 19305558 – 003:2009. – Дата введения в действие 13.03.2009. – Днепропетровск : ООО НПФ «Днепротехсервис», 2009. – 18 с.*
7. Gleeble system. *Физическое моделирование и механические испытания [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://tmslab.spbstu.ru/files/3.pdf>.*
8. Хензель А. *Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд.; пер. с нем.* / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : *Металлургия*, 1982. – 360 с.
9. Фирсова Т. И. *Методика оценки параметров упрочнения-разупрочнения реологически сложных металлов по пластометрическим кривым* / Т. И. Фирсова // *Обработка материалов давлением сборник научных трудов. – 2012. – № 1 (3). – С. 65–68.*

REFERENCES

1. Kolmogorov V. L. *Mehanika obrabotki metallov davleniem* / V. L. Kolmogorov. – М. : *Metallurgija*, 1986. – 688 s.
2. Shlomchak G. G. *Reologicheskaja koncepcija v teorii proklatki metallov* / G. G. Shlomchak // *Teorija i praktika metallurgii. – 2005. – № 3 (52). – S. 39–43.*
3. Poluhin P. I. *Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i spлавov* / P. I. Poluhin, G. Ja. Gun, A. M. Galkin. – М. : *Metallurgija*, 1976. – 488 s.
4. Tret'jakov A. V. *Mehanicheskie svojstva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem* / A. V. Tret'jakov, V. I. Zjuzin. – 2-e izd. – М. : *Metallurgija*, 1973. – 224 s.
5. Klivenko P. L. *Uprochnenie stali i cvetnyh metallov pri holodnoj i gorjachej deformacii : monografija* / P. L. Klivenko. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2011. – 187 s.
6. Rel'sy kontaktnye metropolitena dlja podvedenija jelektricheskogo toka k vagonam metropolitena. *Tehniicheskie uslovija: TU U 27.1 – 19305558 – 003:2009. – Data vvedenija v dejstvie 13.03.2009. – Dnepropetrovsk : ООО NPF «Dneprotehservis», 2009. – 18 s.*
7. Gleeble system. *Fizicheskoe modelirovanie i mehanicheskie ispytanija [Elektronnyj resurs]. – 2009. – Rezhim dostupa: <http://tmslab.spbstu.ru/files/3.pdf>.*
8. Henzel' A. *Raschet jenergosilovyh parametrov v processah obrabotki metallov davleniem: sprav. izd.; per. S nem.* / A. Henzel', T. Shpittel'. – М. : *Metallurgija*, 1982. – 360 s.
9. Firsova T. I. *Metodika ocenki parametrov uprochnenija-razuprochnenija reologicheski slozhnyh metallov po plastometricheskim krivym* / T. I. Firsova // *Obrabotka materialov davleniem sbornik nauchnyh trudov. – 2012. – № 1 (3). – S. 65–68.*

Бергеман Г. В. – канд. техн. наук, ген. дир. ПАО «ЕВРАЗ – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского»;
Соколов С. Ф. – канд. техн. наук, инж.-исслед. НИЛ СПбПУ;
Андреев В. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

ЧТУ – Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохов, Польша;
СПбПУ – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, РФ;
НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: vitaliiandreiev@metal-forming.org