ческую ценность шлака основностью CaO/SiO_2 = 1,1 к углю следует присаживать расчетное количество кусковой извести.

По данным работы [9] перевод доменной печи объемом 2000 м^3 на технологию производства газа позволит газифицировать не менее 1500 т/сут. угля и, следовательно, получить на парокислородном дутье около 150 тыс. м^3/ч синтез-газа.

Выполненный расчет затрат на проведение процесса газификации угля в доменной печи показывает, что себестоимость 1 тыс. м^3 синтез-газа из угля марки ТПМ для получения высокооктанового бензина не превысит 350 руб. [7].

Выводы. Рассмотрены особенности работы доменной печи в режиме газификации углей. Рассчитаны состав парокислородного дутья и расходные коэффициенты сырья и материалов на получение синтез-газа. Выполненные расчеты подтвердили технологическую возможность и экономическую целесообразность использования выводимых из эксплуатации доменных печей в качестве газогенераторов для получения на парокислородном дутье восстановительного газа, а также синтез-газа для производства синтетического жидкого топлива из Кузнецкого угля марки ТПМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроэнергетика России: экономика и реформирование. – М.: Изд-во ИНП, 2011. – 77 с.
2. Гнездилов Е.А., Жуков А.В., Яковлев А.Д. // Фундаментальные исследования. 2007. № 12. С. 342 – 344.
3. Ионе К.Г. Полифункциональный катализ на цеолитах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. – 271 с.
4. Макаров Г.Н., Харлампович Г.Д. Химическая технология твердых горючих ископаемых. – М.: Химия, 1986. – 496 с.
5. Кричко А.А., Лебедев В.В., Фарберов И.Л. Нетопливное использование углей. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
6. Шиллинг Г.Д., Бонн Б., Краус У. Газификация угля / Пер. с нем. – М: Недра, 1986. − 175 с.
7. Школлер М.Б., Кустов Б.А., Михеев Н.И., Валов Н.Н. Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии: Материалы 2-ой международной научно-практической конференции. – М.: изд. МИСиС, 2002. С. 354, 355.
8. Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н., Свитко С.В. // Черная металлургия. 2002. № 10. С. 28 – 31.
9. Товаровский И.Т., Меркулов А.Е., Вышинская Е.Д. // Черные металлы. 2006. № 2. С. 22 – 29.
10. Курунов И.Ф., Аншелес В.Р., Свитко С.В. // Металлург. 1999. № 12. С. 27 – 39.
11. Бесков С.Д. Технохимические расчеты. – М.: Высшая школа, 1966. – 520 с.

Поступила 20 декабря 2011 г.

УДК 621.7:539.52:539.374.004.021.51.72

В.Р. Ганиева, А.С. Любимов, Ф.У. Еникеев

Уфимский государственный нефтяной технический университет

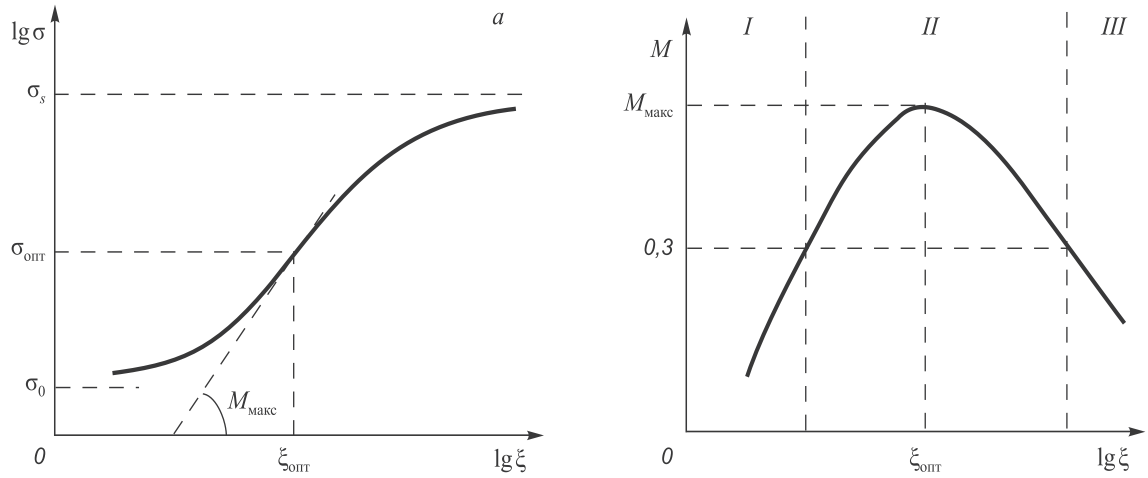
МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ О.М. СМИРНОВА

Способность поликристаллических материалов при определенных температурно-скоростных условиях испытания проявлять аномально высокое (в сотни и тысячи процентов) удлинение при относительно низких напряжениях течения принято называть сверхпластичностью (СП) [1]. Использование СП при обработке металлов давлением во многих случаях обеспечивает снижение деформирующих усилий, повышение коэффициента использования металла, уменьшение числа технологических переходов и улучшение качества деформируемых полуфабрикатов, что и обусловливает значительный интерес к изучению этого явления. В этой связи актуальной задачей становится разработка математических моделей технологических процессов обработки давлением микрокристаллических материалов, основанных на постановке и решении краевых задач механики сверхпластичности.

Ключевым звеном в постановке краевой задачи являются определяющие соотношения – законы связи между напряжениями и деформациями, которые замыкают систему уравнений, составляющих начально-краевую задачу механики. Как отметил в своем докладе А. Барнс [2], в настоящее время все большую роль приобретает применение методов компьютерного моделирования при проектировании технологической оснастки и оптимизации режимов технологических процессов. Построение эффективных компьютерных моделей технологических процессов ОМД в состоянии сверхпластичности требует решения двух взаимосвязанных проблем: необходимо выбрать конкретный вариант постановки краевой задачи механики СП и осуществить рациональный выбор модели материала и методов ее идентификации.

При описании реологического поведения материалов, находящихся в состоянии СП, используется множество самых разнообразных моделей материалов. Наиболее эффективной из них является модель упруго-вязкопластической среды (EVP-среды), предложенная О.М. Смирновым [1], основное соотношение которой имеет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_s \frac{\sigma_0 + K_v \xi^{m_v}}{\sigma_s + K_v \xi^{m_v}}, \quad \xi \neq 0, \qquad (1)$$



Схематические типичные зависимости напряжения течения σ (*а*) и наклона сигмоидальной кривой M (*б*) от скорости деформации ξ на различных стадиях сверхпластичности [1]

где σ_0, σ_s, K_v и m_v – материальные постоянные: σ_0 – пороговое напряжение; σ_s – предел текучести (или предельное напряжение); K_v и m_v – параметры, характеризующие вязкость материала.

Параметры σ_0 и σ_s имеют наглядную графическую интерпретацию (см. рисунок, поз. *а*):

$$\lim_{\xi\to 0}\sigma=\sigma_0;\quad \lim_{\xi\to\infty}\sigma=\sigma_s.$$

Следует отметить, что модель О.М. Смирнова обладает целым рядом несомненных достоинств. Во-первых, она позволяет с достаточной для практических целей точностью описать имеющиеся экспериментальные данные, полученные в одноосных испытаниях при активном нагружении в очень широком интервале скоростей деформации. Во-вторых, при очень больших скоростях деформации существует насыщение, т.е. напряжение стремится к некоторому предельному значению σ_s. В-третьих, самим автором предложен конкретный вариант тензорной записи его модели, основанный на одном из вариантов теории течения. В-четвертых, имеется пороговое напряжение σ_0. Таким образом, модель О.М. Смирнова является, вообще говоря, моделью деформируемого твердого тела, а не жидкости, и основное соотношение для нее более строго может быть записано в виде

$$\xi=\begin{cases}0 \text{ при } \sigma\le\sigma_0;\\ \left[\dfrac{\sigma_s}{K_v}\dfrac{\sigma-\sigma_0}{\sigma_s-\sigma}\right]^{\frac{1}{m_v}} \text{ при } \sigma>\sigma_0.\end{cases}\qquad (1')$$

Многочисленные экспериментальные исследования показали применимость выражения (1) для аппроксимации экспериментальных данных, соответствующих стационарным режимам одноосного деформирования в широком (в пределах 7 ÷ 8 порядков) интервале изменения скоростей деформаций [3]. Серьезнейшим достоинством модели О.М. Смирнова и ее обобщений является широкое применение в практических расчетах [4, 5], модель использована в диссертационных работах[1, 2]. К сожалению, в литературе недостаточное внимание уделяется вопросам разработки методов экспериментального определения значений реологических параметров сверхпластичности σ_0, σ_s, K_v и m_v в модели материала (1) по результатам механических экспериментов. В то же время одним из основных условий успешной научной работы является обеспечение, с одной стороны, воспроизводимости полученных результатов, а с другой – возможности сравнения данных, полученных разными исследователями. С этой целью разрабатываются стандартные методы проведения испытаний и способов обработки экспериментальных данных, способов идентификации используемых в расчетах моделей материалов.

Целью настоящей работы является анализ методик экспериментального определения значений параметров σ_0, σ_s, K_v и m_v для модели О.М. Смирнова по результатам механических испытаний.

О.М. Смирнов предложил следующую методику идентификации своей модели. Сначала графическими методами определяются параметры точки перегиба сигмоидальной кривой сверхпластичности ($\sigma_{опт}$, $\xi_{опт}$ и $M_{макс}$) (см. рисунок). Затем находится значение K_v по формуле $K_v=\sigma_{опт}/\xi_{опт}^{M_{макс}}$. Постоянные σ_0 и σ_s находятся методом экстраполяции, а постоянная m_v вычисляется по формуле $m_v=M_{макс}\left[\left(\sqrt{\sigma_s}+\sqrt{\sigma_0}\right)\big/\left(\sqrt{\sigma_s}-\sqrt{\sigma_0}\right)\right]$. При этом предполагается, что $\sigma_0 \ll \sigma_s$ и, следовательно, $m_v\approx M_{макс}$. Если это не так, то величину параметра K_v определяют по формуле $K_v=\sigma_{опт}/\xi_{опт}^{m_v}$. Эта методика

---

[1] Апатов К.Ю. Разработка процессов получения оболочек сложной формы с поверхностным рельефом из листовой латуни методами сверхпластической формовки. Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2006. 23 с.

[2] Нгуен Чыонг Ан. Сверхпластическая формовка листов алюминиевых сплавов с ультрамелким зерном для получения оболочек с рельефом. Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2009. 22 с.

была применена автором для двух сплавов, полученные результаты представлены в таблице (колонки *2* и *3*).

Авторы работы [3] выполнили статистический анализ точности описания зависимости $\sigma(\xi)$ для титанового сплава ВТ3-1 со средним расстоянием между частицами фаз 5 – 7 мкм при температуре 1200 ± 15 К различными феноменологическими уравнениями, в том числе и выражением (1), в которое вместо порогового напряжения σ_0 было введено произведение $Z\sigma_0$. Параметр Z назван в работе [3] «параметром асимметрии» сигмоидальной кривой; при расчетах было найдено $Z = 3$. Полученные результаты приведены в колонке *4* таблицы.

Как следует из уравнения (1), зависимость $\sigma = f(\xi)$ дробно-рациональная. Соответственно, определение материальных постоянных, входящих в модель О.М. Смирнова, подразумевает применение методов нелинейного регрессионного анализа. В 1987 г. А.С. Пустовгар [6] по тем же экспериментальным данным, что и авторы работы [3], определил параметры модели (1) на основе применения методов нелинейного регрессионного анализа (колонка *5* таблицы). В работе [6] приводится также график зависимости $\sigma(\lg\xi)$, иллюстрирующий удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Как уже отмечено выше, на практике величину параметров σ_0 и σ_s задают, исходя из приписываемого им физического смысла, путем экстраполяции экспериментальной кривой $\lg\sigma - \lg\xi$ в область низких и высоких значений ξ соответственно (см. рисунок, поз. *а*). Точность такого метода определения постоянных σ_0 и σ_s заведомо невысокая. Кроме того, проведение экспериментов при очень низких скоростях деформации порядка 10^{-7} с$^{-1}$ требует больших затрат времени (по данным работы Рэя и Гранта [7] составляет около трех месяцев на один образец).

Значения параметров в модели О.М. Смирнова [1]

Параметр	Значение параметра для сплава			
	Mg – 6 % Zn – 0,5 % Zr [1]	Zn – 22 % Al [1]	ВТ3–1 [3]	ВТ3–1 [9]
1	*2*	*3*	*4*	*5*
σ_0, МПа	1,200	0,140	0,314	0,314
σ_s, МПа	100,0	280,0	234,8	250,0
m_v	0,620	0,470	0,531	0,503
K_v, МПа$\cdot c^m$	–	–	771,6	690,0
δ, %	2,70	10,90	3,78	8,46
$\xi_{мин}/\xi_{макс}$, с$^{-1}$	$10^{-6}/10^{-1}$	$10^{-6}/10^{1}$	$10^{-6}/10^{0}$	$10^{-7}/10^{0}$

Примечание. δ – ошибка аппроксимации (среднее квадратическое отклонение); $\xi_{мин}/\xi_{макс}$ – интервал скоростей деформации, для которого получена аппроксимация.

Рассмотрим вывод основных соотношений. Перепишем основное соотношение модели О.М. Смирнова (1) в следующем виде:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + K_v\xi^{m_v}}{1 + K_v\xi^{m_v}/\sigma_s}. \quad (2)$$

Из зависимости (2) следует, что если скорости деформации малы, выражение (2) в предельном случае переходит в известную в сверхпластичности модель материала вида

$$\sigma = \sigma_0 + K'\xi^{m'}, \quad (3)$$

где σ_0, $K' = K_v$, $m' = m_v$ – реологические постоянные материала.

Следовательно, значения этих постоянных могут быть определены, например, по описанной в работе [8] методике. При этом следует иметь в виду, что, как показывает теоретический анализ модели (3) [9], зависимость наклона сигмоидальной кривой в этом случае имеет монотонно возрастающий вид. По этой причине при идентификации модели (3) необходимо использовать экспериментальные данные, соответствующие первым двум стадиям сверхпластичности, т.е. при $\xi < \xi_{опт}$ (см. рисунок). В то же время, как уже отмечено выше, одним из ключевых достоинств модели О.М. Смирнова является возможность описания всей сигмоидальной кривой сверхпластичности. Кроме того, при использовании модели (3) в принципе отсутствует возможность определения четвертого реологического параметра σ_s. По этой причине представляется целесообразным разработать специализированную методику определения значений всех четырех постоянных σ_0, σ_s, K_v и m_v по заданному входному набору

$$\{\sigma_i, \varepsilon_i\},\ i = 1, 2, ..., 3, N, \quad (4)$$

где σ_i – напряжение течения, соответствующее скорости деформации ε_i; $N \geq 4$ – количество имеющихся в распоряжении экспериментальных точек сигмоидальной кривой сверхпластичности.

На основании выражения (2) составим следующую целевую функцию:

$$\Phi(\sigma_0, K_v, \sigma_s, m_v) = \\ = \sum_{i=1}^{N}\left[\sigma_0 + K_v\xi_i^{m_v}\left(1 - \sigma_i/\sigma_s\right) - \sigma_0\right]^2 \to \min; \quad (5)$$

здесь σ_i и ε_i – значения напряжения и скорости деформации из входного набора (4).

Для минимизации целевой функции применим процедуру внешнего цикла, предложенную авторами работы [10]. Предположим, что величина параметра m_v известна. Тогда целевая функция (5) становится функцией трех переменных (σ_0, σ_s, K_v); обозначим ее $F(\sigma_0, \sigma_s, K_v)$.

Необходимые условия минимума этой функции $\partial F/\partial\sigma_0 = 0$, $\partial F/\partial\sigma_s = 0$, $\partial F/\partial K_v = 0$ приводят к следующей системе уравнений:

$$\partial F\left(\sigma_0, K_v, \sigma_s\right)/\partial\sigma_0 =$$
$$= -2\sum_{i=1}^{N}\left[\sigma_0 + K_v\xi_i^{m_v}\left(1-\sigma_i/\sigma_s\right) - \sigma_0\right] = 0; \qquad (6a)$$
$$\partial F\left(\sigma_0, K_v, \sigma_s\right)/\partial K_v =$$
$$= 2\sum_{i=1}^{N}\left[\sigma_0 + K_v\xi_i^{m_v}\left(1-\sigma_i/\sigma_s\right) - \sigma_0\right]\xi_i^{m_v}\left(1-\sigma_i/\sigma_s\right) = 0; \qquad (6b)$$
$$\partial F\left(\sigma_0, K_v, \sigma_s\right)/\partial\sigma_s =$$
$$= -2\sum_{i=1}^{N}\left[\sigma_0 + K_v\xi_i^{m_v}\left(1-\sigma_i/\sigma_s\right) - \sigma_0\right]K_v\xi_i^{m_v}/\sigma_s^2 = 0. \qquad (6c)$$

Выражения (6*a*) и (6*b*) представляют собой линейную систему из двух уравнений относительно двух неизвестных σ_0 и K_v (при известном значении σ_s), ее можно решить по формулам Крамера или методом Гаусса. В результате можно записать следующее:

$$\sigma_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{2m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)}{N\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{2m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)^2 - \left[\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)\right]^2} -$$
$$-\frac{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)}{N\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{2m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)^2 - \left[\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)\right]^2}; \qquad (7a)$$

$$K_v = \frac{N\sum_{i=1}^{N}\sigma_i\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right) - \sum_{i=1}^{N}\sigma_i\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)}{N\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{2m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)^2 - \left[\sum_{i=1}^{N}\xi_i^{m_v}\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_s}\right)\right]^2}. \qquad (7b)$$

Если подставить σ_0 и K_v из выражений (7*a*) и (7*b*) в выражение (6*c*), получим трансцендентное уравнение относительно одного неизвестного σ_s, которое может быть решено стандартными численными методами. В результате будет найдено некоторое значение этого параметра $\sigma_s(m_v)$ (это значение найдено *при известном* m_v). Подставляя известное значение m_v и найденное в результате решения трансцендентного уравнения (6*c*) значение $\sigma_s(m_v)$ в выражения (7), найдем соответствующие значения двух других реологических параметров $\sigma_0(m_v)$ и $K_v(m_v)$ (они определены *при известном* m_v).

Если теперь подставить набор значений реологических постоянных m_v, $\sigma_s(m_v)$, $\sigma_0(m_v)$ и $K_v(m_v)$ в выражение для целевой функции (5), то получим ее значение, соответствующее заданному (известному) значению m_v: $F(\sigma_0(m_v), \sigma_s(m_v), K_v(m_v)) = F_{\text{мин}}(m_v)$. Если повторить всю описанную выше процедуру с другим значением m_v, получим другое значение целевой функции. В результате получаем функцию одной переменной $F_{\text{мин}}(m_v)$, которую можно минимизировать стандартным методом скалярной оптимизации, например, методом золотого сечения; в результате будет получен окончательный результат идентификации

$$\Phi_{\text{мин}} = \min_{m_v\in(0:1)} F_{\text{мин}}\left(m_v\right). \qquad (8)$$

Значения реологических параметров σ_0, σ_s, K_v и m_v, при которых целевая функция $\Phi(\sigma_0, \sigma_s, K_v, m_v)$ из выражения (5) достигнет своего минимума (8), и будут искомым решением обратной коэффициентной задачи идентификации модели О.М. Смирнова (1) по заданному входному набору данных (4).

Рассмотрим тестирование методики. Свойства тестового объекта (виртуального материала) – это конкретные значения реологических параметров σ_0, σ_s, K_v и m_v, приведенные в работах других авторов.

В настоящей работе тестирование программного средства проводится в следующем порядке.

1. Выбираем конкретные значения σ_0 = 0,314 МПа, σ_s = 250 МПа, K_v = 690 МПа$\cdot c^m$ и m_v = 0,503 (см. колонку *4* таблицы). Далее будем называть этот набор значений вектором констант виртуального материала.
2. Выбираем тестовый интервал значений скорости деформации: $\xi_{\text{мин}} = 1\cdot10^{-7}$ с$^{-1}$, $\xi_{\text{макс}} = 1\cdot10^{-1}$ с$^{-1}$.
3. Выбираем объем входного набора (4) $N = 20$.
4. Разбиваем тестовый интервал на равномерные (по логарифмической шкале значений скорости деформации ξ) отрезки; в итоге получаем набор значений ξ_i = 1, 2, …, N.
5. Генерируем тестовый набор значений σ_i по формуле (1), используя вектор констант виртуального материала и значения ξ_i.
6. «Забываем» о том, что вектор констант виртуального материала известен, и вводим в тестируемое программное средство полученный (в п. 4, 5) входной набор $\{\sigma_i, \xi_i\}$, $i = 1, 2, \ldots, N$.
7. Сравниваем «выход» (результат работы программы) с «входом» (вектором констант виртуального материала). Если «выход» не совпал со «входом», необходимо отлаживать тестируемое программное средство, если совпал – переход к п. 8.
8. Вывод результата идентификации (набора констант σ_0, σ_s, K_v и m_v) и минимального значения целевой функции $\Phi_{\text{мин}}$ из выражения (8); это необходимо для оценки вычислительной погрешности.
9. Для повышения точности вычислений можно подобрать параметры счета (параметры использованных в программном средстве численных методов).

Использованное в настоящей работе программное средство было протестировано по описанному выше алгоритму. «Выход» совпал со «входом», при этом значение целевой функции оказалось равным $\Phi_{\text{мин}} = 2{,}5\cdot10^{-23}$ МПа^2. После этого вся процедура была повторена для набора констант, приведенного в колонке *4* таблицы: σ_0 = 0,314 МПа, σ_s = 234,8 МПа, K_v = 771,6 МПа·с^m и m_v = 0,531. Результат снова был положительным: «выход» совпал со «входом» при $\Phi_{\text{мин}} = 9{,}6\cdot10^{-22}$ МПа^2. После этого были проведены дополнительные серии расчетов, в которых изменялся объем входных данных. Во всех случаях, вплоть до минимально возможного значения $N = 4$, «вход» совпадал с «выходом».

Для практической апробации методики необходим входной набор данных (4). Используем в этом качестве данные работы [11] для сплава Al – 33 % Cu с различным средним размером d зерен. Так, в частности, для сплава с d = 3,8 мкм при скоростях деформации $1\cdot10^{-4}$, $5\cdot10^{-4}$, $1\cdot10^{-3}$, $4\cdot10^{-3}$, $8\cdot10^{-3}$ и $1{,}5\cdot10^{-2}$ с$^{-1}$ напряжения течения равны соответственно 200, 520, 905, 2100, 3100 и 4200 psi (1 psi = 689,48 Па). Значения реологических постоянных для сплава Al – 33 % Cu с d = 3,8 мкм, рассчитанные по этим исходным данным по предлагаемой в настоящей работе методике, оказались равными σ_0 = 0,182 МПа, σ_s = 72,7 МПа, K_v = 1083 МПа·с^m и m_v = 0,743. Чтобы оценить по этим результатам оптимальные условия сверхпластичности для этого сплава, воспользуемся формулами из работы [1]:

$$\sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\sigma_s\sigma_0}; \;\; M_{\text{макс}} = m_v \frac{\sqrt{\sigma_s} - \sqrt{\sigma_0}}{\sqrt{\sigma_s} + \sqrt{\sigma_0}}; \;\; \xi_{\text{опт}} = \left(\frac{\sqrt{\sigma_s\sigma_0}}{K_v}\right)^{1/m_v}.$$

Расчеты по этим формулам привели к следующим результатам: $M_{\text{макс}}$ = 0,672, $\sigma_{\text{опт}}$ = 3,64 МПа и $\xi_{\text{опт}} = 4{,}7\cdot10^{-4}$ с$^{-1}$. Эти результаты хорошо согласуются с независимыми измерениями авторов работы [11], которые нашли, что максимальный наклон сигмоидальной кривой сверхпластичности для этого сплава равен 0,67 при скорости деформации $1\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$.

Таким образом, практическое применение предложенной в настоящей работе методики позволило получить удовлетворительные результаты при анализе данных работы [11].

Предлагаемая в настоящей работе методика идентификации модели О.М. Смирнова (1) по входному набору (4) основана на минимизации отклонений расчетного отклика материала от соответствующих значений, полученных в результате обработки первичных экспериментальных данных. Несмотря на то, что полученные математические выражения довольно громоздкие, программирование предложенного алгоритма не должно вызывать серьезных затруднений. Возможности современных общедоступных средств вычислительной техники таковы, что время счета обычно не превышает одной секунды. Созданное в результате программное средство должно быть в обязательном порядке протестировано с целью проверки правильности его работы, после чего оно может быть рекомендовано к практическому использованию при обработке экспериментальных данных наряду с другими известными из литературы методиками идентификации модели О.М. Смирнова.

Выводы. Предлагается методика расчета значений реологических параметров, входящих в известную дробно-рациональную модель сверхпластичности, предложенную О.М. Смирновым. Методика основана на минимизации отклонения расчетного отклика теоретической кривой от значений, полученных в результате обработки первичных экспериментальных данных. Разработан алгоритм минимизации целевой функции четырех переменных, эффективность работы которого подтверждена в результате проведения тестовых расчетов. Практическая апробация предлагаемой методики проведена по литературным данным на примере сплава Al – 33 % Cu со средним размером зерен 3,8 мкм. Получены удовлетворительные результаты идентификации, хорошо согласующиеся с данными других авторов. Сделан вывод о применимости предложенного подхода к обработке сигмоидальных кривых сверхпластичности с целью определения значений реологических параметров модели О.М. Смирнова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
2. Barnes A.J. Superplastic aluminum forming – expanding its techno-economic niche // Materials Science Forum. 1999. V. 304 – 306. P. 785 – 796.
3. Бойцов В.В., Цепин М.А., Карпилянский Н.Н., Ершов А.Н. // Изв. вуз. Цветная металлургия. 1982. № 5. С. 69 – 74.
4. Чумаченко Е.Н., Скороходов А.Н., Александрович А.И. и др. // Изв. вуз. Черная Металлургия. 1981. № 11. С. 89 – 93; 1982. № 1. С. 60 – 63.
5. Таюпов А.Р., Круглов А.А., Рыжков В.Г., Бердин В.К. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 7. С. 57 – 59.
6. Пустовгар А.С. – В кн.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. – Тула: изд. ТПИ, 1987. С. 39 – 42.
7. Rai G., Grant N.J. On the measurements of superplasticity in an Al – Cu alloy // Metallurigical Transactions. 1975. V. 6A. № 1. P. 385 – 390.
8. Еникеев Ф.У. // Заводская лаборатория. 2002. № 7. С. 39 – 42.
9. Enikeev F.U. Determination of the value of the threshold stress for superplastic flow // Materials Science & Engineering. 2000. V. A276. P. 22 – 31.
10. Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 9. С. 48 – 56.
11. Holt D.L., Backofen W.A. Superplasticity in the Al-33Cu Eutectic Alloy // ASM Trans Quart. 1966. V. 59. P. 755.

Поступила 15 июня 2011 г.