

УДК 621.771.001

Соснев И. Ю.  
Шломчак Г. Г.**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ МЕТАЛЛОВ  
ПОНИЖЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ**

Характеристики пластичности (прочности) металлов – относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ , полученные в условиях стандартных испытаний одноосным нагружением – весьма условны. Являясь безразмерными, эти величины без преобразования методами анализа размерностей могли бы быть использованы в качестве критериев моделирования (критериев подобия) в экспериментальных исследованиях процессов пластического формоизменения металлов.

Однако, для изучения процессов, отличающихся сложными видами нагружения и сверхбольшими деформациями, они – неприемлемы. Главная причина заключается в отсутствии методов пересчета  $\delta$  и  $\psi$  на реальные процессы. Что же касается перспектив аналитического определения (средствами математической теории пластичности или металлофизики) условий разрушения и закономерностей развития дефектов реальных металлов на макроуровне при обработке давлением, то они – весьма туманны [1, 2]. Поэтому единственным эффективным путем к созданию новых интенсивных технологических процессов прокатки реологически сложных (РС) с пониженной пластичностью металлов или сплавов являются методы физического моделирования.

При этом важно иметь ввиду, что любой лабораторный эксперимент должен строго подчиняться законам его проведения – всесторонне обоснованной системе критериальных уравнений подобия [3].

Цель работы – создание системы критериев подобия процессов прокатки, склонных к разрушению реологически сложных металлов.

*1. Некоторые положения теории разрушения.*

Согласно имеющимся разработкам в теории разрушения металлов при пластическом их формоизменении запас пластичности определяется соотношением [4]:

$$\psi_p = \int_0^t B(\tau) \frac{H d\tau}{\Lambda_p}, \quad (1)$$

где  $\psi_p$  – степень использования запаса пластичности металла ( $\psi_p = 1$  – условие разрушения);  $H \cdot d\tau = d\Lambda$  – накопление степени деформации за время  $d\tau$ ;  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $B(\tau)$  – коэффициент, учитывающий немонотонность нагружения;  $\Lambda_p$  – накопленная степень деформации сдвига к моменту разрушения.

Чтобы рассчитать  $\psi_p$ , необходимо решить ряд сложных задач по определению параметров траекторий движения частиц в очаге деформации, величин интенсивностей скоростей деформации сдвига  $H$ , параметров напряженно-деформированного состояния металла и, в итоге, показателей напряженного состояния –  $\sigma/T$  ( $\sigma$  – гидростатическое давление в исследуемой точке;  $T$  – интенсивность касательных напряжений) вдоль указанных траекторий.

Согласно работе [4] условие разрушения (1) дает удовлетворительные результаты для процессов, близких к монотонным (при  $B(\tau) = 1$ ), что соответствует максимальной интенсивности пластического «разрыхления» при данном показателе напряженного состояния. При немонотонном нагружении интенсивность пластического разрыхления, как правило, уменьшается, а пластичность металла при данном показателе напряженного состояния увеличивается.

Оценку запаса пластичности при растяжении образцов (монотонный процесс) на практике рекомендуется определять по формуле [4]:

$$\Lambda_p = 2 \cdot \sqrt{3} \ln \frac{d_o}{d_k}, \quad (2)$$

где  $d_o$  и  $d_k$  – диаметр образца до и после испытаний;  $\Lambda_p$  – степень деформации сдвига, соответствующая моменту разрушения ( $d = d_k$ ), характеризует пластичность материала. Если при пластическом растяжении до разрушения шейка на образце не формируется (разрушение при однородной деформации) степень деформации сдвига определяется через относительное удлинение:

$$\Lambda_p = \sqrt{3} \ln \frac{100}{100 - \delta}, \quad (3)$$

где  $\delta = \Delta l / l_0$  – относительное удлинение образца;  $\Delta l = l_k - l_0$ ;  $l_0$  и  $l_k$  – длина образца до и после испытаний.

При неоднородной деформации предельная степень деформации сдвига может быть вычислена через относительное сужение [4]:

$$\Lambda_p = \sqrt{3} \ln \frac{100}{100 - \psi}, \quad (4)$$

где  $\psi$  – относительное сужение.

Графическая зависимость  $\Lambda_p - \delta$  имеет вид, представленный на рис. 1.

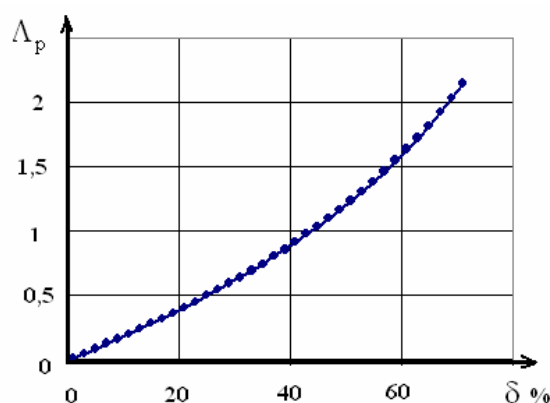


Рис. 1. Зависимость степени деформации сдвига  $\Lambda_p$  (момент разрушения) от величины относительного удлинения  $\delta$ , %

Аналогичный график можно построить относительно величин  $\Lambda_p - \psi$ . Как следует из рис. 1, зависимость  $\Lambda_p - \delta$  – это медленно возрастающая, гладкая функция.

По заключению авторов работы [4] стандартные характеристики пластичности металла  $\delta$  и  $\psi$  – относительно реальных процессов условны. Принимая во внимание трудоемкость (а чаще и невозможность) расчетов характеристик пластичности металлов в процессах со сложными законами нагружения, например, процессов прокатки, а также, учитывая характер зависимостей  $(\Lambda_p - \delta)$ ,  $(\Lambda_p - \psi)$ , можно утверждать, что стандартные характеристики  $\delta$  и  $\psi$  можно использовать в качестве критериев, но только лишь для оценки пластичности металла и только в условиях стандартных испытаний.

В случаях изучения процессов разрушения реальных металлов они – необходимы, но – недостаточны. При переходе к экспериментальным методам исследования процессов

пластического течения и разрушения металлов (реологически сложных), нужно использовать систему критериев, построенных на принципах анализа размерностей (на теоремах классической теории подобия).

2. Теория подобия процессов прокатки реологически сложных металлов.

2.1. Определяющие параметры высокого очага деформации.

Критериальные уравнения исследуемого процесса разрабатывались в рамках фракционного анализа математической модели исследуемого процесса с привлечением экспериментально полученных дополнительных уравнений и дополнительных параметров [5].

Рассмотрен случай простой прокатки высокой полосы из стали III реологического класса сложности (один максимум  $\sigma_{s_{\max}}$  на кривой  $\sigma - \bar{\varepsilon}$ ) с разделением параметров на подсистемы [3, 6]:

– макрогеометрическую ( $H, R, B$  – исходные параметры, определяющие геометрию системы полоса-валок;  $h$  – конечная высота полосы);

– микрогеометрическую ( $\bar{R}_z, \bar{R}_a, \bar{t}_p$  – параметры состояния поверхности полосы и валков с учетом их направленности или параметры любого рельефа, нанесенного на валки или полосу, с целью усиления захватывающей их способности и т. п.);

– реологическую упругую ( $E_g, \mu_g$  и  $E_n, \mu_n$ , т. е. модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов валков и полосы соответственно согласно уравнению Гука);

– реологическую пластическую ( $\sigma_{s_0}$  – исходная величина сопротивления деформации металла;  $\sigma_{s_{\max}}$  – максимум на кривой  $\sigma - \bar{\varepsilon}$ ;  $\bar{\varepsilon}_x$  – характеристическая степень деформации, соответствующая  $\sigma_{s_{\max}}$  – максимуму на кривой;  $\sigma_{s_{\min}}$  – условная величина сопротивления деформации при  $\bar{\varepsilon} = 2 \cdot \bar{\varepsilon}_x$ ).

2.2. Системы критериев подобия

Преобразование полного списка параметров в рамках фракционного анализа осуществляют методом нормализации уравнений математической модели процесса прокатки или преобразованием списка параметров, описывающих процесс, с применением  $\pi$  – теоремы анализа размерностей. Использовались первый и второй способы. Системы критериальных уравнений получены идентичные [3].

Доказана правомочность дополнения списка критериев подобия процесса прокатки малопластичных металлов сложной реологии с разрушением. Необходимым условием при этом является использование результатов стандартных испытаний образцов металлов на разрыв. Здесь следует акцентировать внимание на впервые экспериментально установленном факте: РС металлы III-го реологического класса сложности при испытании пластическим растяжением разрушаются вязко при деформации  $\bar{\varepsilon}_x$  (при  $\psi \rightarrow 100\%$ ), т. е. при  $\delta \cong \bar{\varepsilon}_x$ . Это происходит благодаря лавинообразному разупрочнению металла с локальным ростом степени его деформации в шейке образца. В случае вторичного упрочнения металла (IV реологический класс сложности) в шейке металл вновь бы упрочнился и она (шейка) обрела бы равномерно вытянутую форму [6].

Известно, что преобладающее большинство металлов и сплавов являются реологически сложными III реологического класса. Если нет экспериментально полученных на пластометре семейств реологических кривых металла, но из справочника по их механическим испытаниям известно, что относительное его сужение  $\psi \rightarrow 70...100\%$ , а относительное удлинение  $\delta \ll \psi$ , например,  $\psi = 10...30\%$ , то такой металл является реологически сложным III-го класса. При этом:

$$\delta \approx \bar{\varepsilon}_x.$$

В этом нетрудно убедиться, анализируя результаты современных пластометрических испытаний [7, 8 и др.] с результатами испытаний на растяжение соответствующих металлов. В связи с этим одним из определяющих критериев подобия двух металлов (модели и натуре) является:

$$\pi_1 = \bar{\varepsilon}_x = idem. \quad (5)$$

Была разработана методика, получены и проверены экспериментально, а также опубликованы в работах [3, 6] критерии реологического подобия:

– модуль деформационного динамического упрочнения:

$$\pi_2 = m_{\bar{\varepsilon}_{упр}} = idem; \quad (6)$$

– модуль деформационного разупрочнения:

$$\pi_3 = m_{\bar{\varepsilon}_{разупр}} = idem; \quad (7)$$

– модуль деформационного скоростного упрочнения:

$$\pi_4 = m_{\dot{\varepsilon}_{упр}} = idem; \quad (8)$$

– модуль деформационного скоростного разупрочнения:

$$\pi_5 = m_{\dot{\varepsilon}_{разупр}} = idem; \quad (9)$$

– критерии подобия упругих характеристик системы валок-полоса:

$$\pi_6 = \sigma_{s_i} / E_i = idem; \quad (10)$$

$$\pi_7 = \mu = idem. \quad (11)$$

В критериях  $\pi_6 - \pi_7 : \sigma_{s_i}$  – значение сопротивления деформации в любых сходственных точках на кривых  $\sigma - \bar{\varepsilon}$  модели материала и его природы;  $E$  – модуль упругости материала валков и  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала валков модели и природы.

Необходимым условием реологического подобия процессов прокатки малопластичных реологически сложных металлов является равенство критериев  $\pi_1 - \pi_7$ . Если дополнить эту систему критериями разрушения  $\delta$  и  $\psi$ , то полученная система станет достаточной для экспериментального изучения механизмов разрушения металлов.

Обозначим эти критерии подобия (для материалов модели и природы):

$$\pi_8 = \delta = idem; \quad (12)$$

$$\pi_9 = \psi = idem. \quad (13)$$

Безусловно, реологическое подобие процессов будет обеспечено только в случае равенства макрогеометрических критериев подобия:

$$\pi_{10} = \frac{h}{H} = idem; \quad (14)$$

$$\pi_{11} = \frac{R}{H} = idem; \quad (15)$$

$$\pi_{12} = \frac{B}{H} = idem; \quad (16)$$

и микрогеометрических критериев подобия:

$$\pi_{13} = \frac{\bar{R}_a}{R} \text{ или } \frac{\bar{R}_z}{R} = idem; \quad (17)$$

$$\pi_{14} = \bar{t}_p = idem. \quad (18)$$

Следует отметить, что при соблюдении равенства критериев подобия  $\pi_1 - \pi_{14}$  автоматически обеспечивается кинематическое подобие при условии эквидистантности кривых  $\sigma - \dot{\varepsilon}$ , полученных при различных скоростях деформации:

$$\pi_{15} = \left[ \frac{\dot{\varepsilon}_{cx} \cdot H}{U_{\phi}} \right]_{\text{нат}} = \left[ \frac{\dot{\varepsilon}_{cx} \cdot H}{U_{\phi}} \right]_{\text{мод}}, \quad (19)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{cx}$  – скорость деформации металла в сходственных точках природы и модели;  $H$  – сходственный геометрический параметр модели и природы,  $U_{\phi}$  – окружная скорость валков.

## ВЫВОДЫ

Для моделирования процессов прокатки III реологического класса сложности (динамически разупрочняющихся с одним максимумом на пластометрических кривых  $\sigma - \bar{\varepsilon}$ ) металлов, склонных к разрушению, предложена система критериев подобия, включающая подсистемы: геометрического и микрогеометрического подобия; подобия условий контактного взаимодействия валков и полосы; реологического подобия и др.

Показано, что моделирование указанных процессов с целью установления причин возникновения и развития дефектов деформируемого металла система критериев подобия становится достаточной при включении в нее стандартных безразмерных прочностных характеристик – относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$ .

Впервые обнаружено, что динамически разупрочняющиеся металлы III реологического класса сложности могут вязко разрушаться при пластическом растяжении до степеней деформации, близких по величине к характеристическим степеням ( $\delta \cong \bar{\varepsilon}_x$ ) за счёт лавинообразного разупрочнения в шейке образца. Это позволяет даже без пластометрических испытаний установить, что при условии  $\delta \ll \psi$  металл относится к III-му реологическому классу сложности и разрабатывать методы прогнозирования (и предупреждения) вязкого его разрушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ключников В. Д. Теория пластичности: современное состояние и перспективы / В. Д. Ключников // *Мех. тверд. тела.* – 1993. – № 2. – С. 102–116.
2. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О. А. Кайбышев. – М.: *Металлургия*, 1975. – 280 с.
3. Шломчак Г. Г. Развитие теории и методологии физического эксперимента в обработке давлением металлов сложной реологии / Г. Г. Шломчак // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – Днепропетровск, 2000. – № 8–9. – С. 90–92.
4. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов и др. – М.: *Металлургия*, 1977. – 336 с.
5. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы / С. Дж. Клайн. – М.: *Мир*, 1968. – 302 с.
6. Шломчак Г. Г. Основы научных исследований. Теория эксперименту в обробці металів тиском: навч. посібник / Г. Г. Шломчак. – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – 159 с.
7. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: *Металлургия*, 1983. – 352 с.
8. Suzuki H. Report of the industrial science / H. Suzuki // *University of Tokyo.* – 1968. – Vol. 18. – № 3. – 240 p.

Шломчак Г. Г. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Соснев И. Ю. – аспирант НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: grox2004@yandex.ru