

*А. П. КРЕНЬ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.*

*Г. А. ЛАНЦМАН<sup>1</sup>,*

*Т. А. ПРОТАСЕНЯ<sup>1</sup>, канд. техн. наук.*

*А. Ю. КУТЕПОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук.*

*О. В. МАЦУЛЕВИЧ<sup>1</sup>, канд. техн. наук.*

*А. В. НИКИФОРОВ<sup>2</sup>,*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь)

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДЕФОРМАЦИЯХ И СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ**

### **Аннотация**

Проведена оценка характера изменения напряжения течения металла при различных температурах, деформациях и скоростях деформации. Показано, что полученная математическая модель процесса деформирования может использоваться для анализа поведения материала при одноосном нагружении с использованием коэффициента стеснения, рассчитываемого на основании данных индентирования и статических испытаний на растяжение (сжатие) металла.

**Ключевые слова:** индентирование, металлы, твердость, температура, деформация, напряжение течения.

**Введение.** Измерение таких важных для инженерных расчетов характеристик, как предел текучести, прочность, относительное удлинение стандартными методами испытаний при высоких температурах затруднительно. Поэтому измерение твердости металла в горячем состоянии является хорошей альтернативой для опосредованной оценки свойств и получения температурных зависимостей связанных с ней физико-механических характеристик. Целью исследования является моделирование процесса пластического течения металла в статическом и динамическом режимах при различных температурах и скоростях деформации и экспериментальная проверка результатов с использованием метода индентирования.

**Основные положения.** Для оценки устойчивости материала к пластическому течению используют величину напряжения течения при пластической деформации. Эта величина может характеризоваться либо пределом текучести, либо непосредственно значением напряжения, вызывающим сдвиг материала – напряжением течения в данный момент времени, либо значением твердости. При этом твердость имеет физический смысл среднего давления (напряжения), создаваемого в отпечатке. Увеличение

скорости деформации обычно увеличивает значение напряжения течения и сдвигает кривую напряжение-деформация в область более высоких значений.

Температурная зависимость предела текучести была исследована различными авторами и приближенно ее можно описать с помощью кривой, представленной на рис. 1.

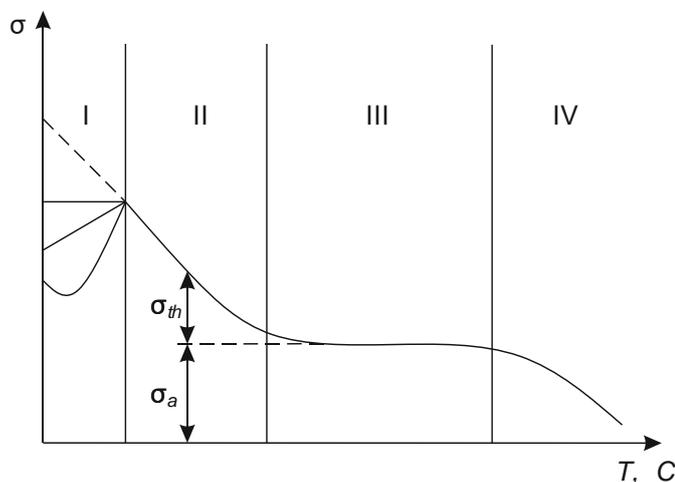


Рис. 1. Изменение напряжения течения при повышении температуры

Следуя данной зависимости, можно выделить четыре основные области: 1 – зона низких температур, в которой поведение материала может описываться любой тенденцией в зависимости от типа кристаллической решетки, прочности, остаточных напряжений и других факторов, 2 – зона повышенных температур, где предел текучести снижается с увеличением температуры, пока не достигнет области 3, где температура не влияет на предел текучести, и далее следует зона 4, где температура вновь резко влияет на характеристики текучести металла. Отметим, что для разных металлов некоторые из зон могут отсутствовать, что в значительной мере определяется процессом движения дислокаций.

Рассмотрев свободную энергию Гиббса [1], необходимую для активации процесса деформирования через ее термическую и атермическую составляющие, а также приняв во внимание ее линейную зависимость от приложенных напряжений, было получено выражение для напряжения течения:

$$\sigma = B \varepsilon_p^n \left( 1 + B_1 T [\dot{\varepsilon}_p]^{1/m} - B_2 T e^{A(1-\frac{T}{T_t})} \right) + Y_a, \quad (1)$$

где –  $\varepsilon_p^n$  эквивалентная пластическая деформация,  $\dot{\varepsilon}_p$  – эквивалентная скорость пластической деформации,  $T$  – температура,  $T_t$  – температура, выше которой термическая составляющая энергии активации остается постоянной,  $Y_a$  – часть напряжений, которые не зависят от температуры,  $B$  и  $n$  – коэффициенты,  $A$  – некоторая постоянная.

В некоторых работах [2] также показана связь напряжений и деформаций в следующем виде:

$$\hat{\sigma} = B \varepsilon_p^n . \quad (2)$$

**Экспериментальные исследования.** Экспериментальная проверка полученного выражения (1) проводилась на примере образца из алюминиевого сплава Д16. В качестве оборудования использовались два типа приборов: статический твердомер Бринелля со сферическими наконечниками диаметром  $D=1; 2; 2,5; 5$  и  $10$  мм и твердомер Роквелла, в который для создания малых усилий  $P$  и деформаций  $\varepsilon$  (до 4 %) закреплялись сферические наконечники. Перед проведением испытаний индентор прогревался с помощью газовой горелки, чтобы уменьшить влияние разности температур и закалки образца в месте соприкосновения вследствие достаточно длительного контакта (свыше 20 с). Расчет твердости по Мейеру производился по формуле:

$$HM = 4P/\pi d^2, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр отпечатка.

Расчет создаваемой эквивалентной пластической деформации определялся:

$$\varepsilon = 0,2d/D. \quad (4)$$

Для динамического индентирования использовался твердомер ТПЦ-7, в котором также использовались инденторы с различным радиусом закругления ( $D=1; 2; 2,5$  мм) для создания разной деформации.

Согласно имеющимся данным алюминий и его сплавы показывают четкую тенденцию к снижению предела текучести при повышении температуры без выхода на некоторое постоянное значение вплоть до температуры плавления, что означает  $Y_a = 0$ . Постоянные  $B$  и  $n$  в (2) могут быть определены с использованием зависимости твердости  $HM$  (среднего контактного давления) от температуры (рис. 2). Для получения этого графика использовались различные инденторы и усилия вдавливания, а эквивалентная деформация рассчитывалась по формуле (4). Пересечение кривых на рис. 2 с осью ординат представляет собой гипотетическое значение твердости при нулевой температуре.

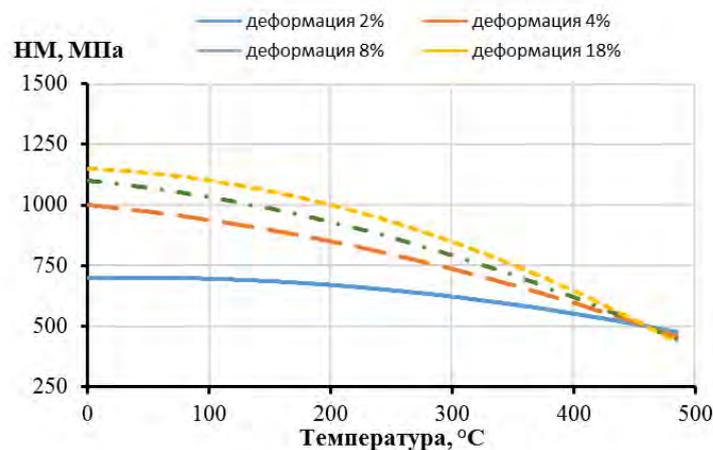


Рис. 2. Зависимость твердости от температуры для различных уровней создаваемой пластической деформации

Если перенести эти значения на график твердости от пластической деформации (рис. 3) и провести аппроксимацию, согласно уравнению (2), получим значения  $B = 1420$  и  $n = 0,14$ .

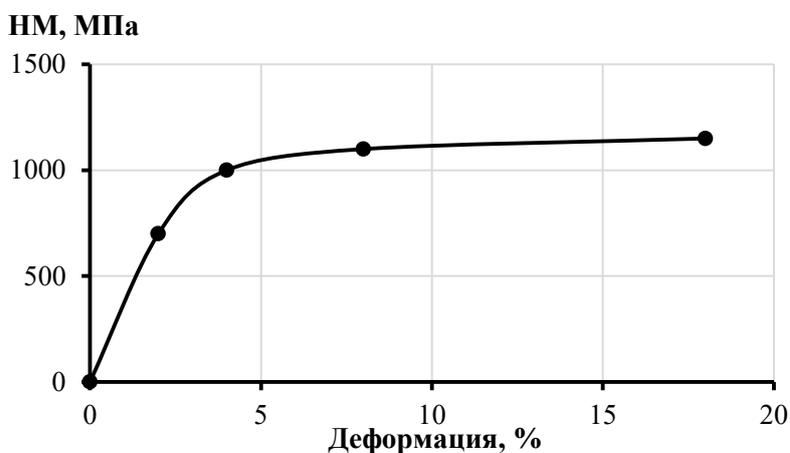


Рис. 3. График для определения  $B$  и  $n$  по методу наименьших квадратов

Температуру  $T_t$  можно принять как половину от температуры плавления алюминия –  $330\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2].

Определение констант  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $A$  и  $m$  производилось исходя из следующих полученных зависимостей: 1) изменения твердости (среднего контактного давления) от температуры при постоянной низкой скорости деформации (при статическом индентировании  $\dot{\epsilon}$  до  $0,1\text{ с}^{-1}$ ); 2) то же, но при высокой скорости деформации (рис. 4) и 3) зависимости  $HM$  от скорости деформации при постоянной температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5).

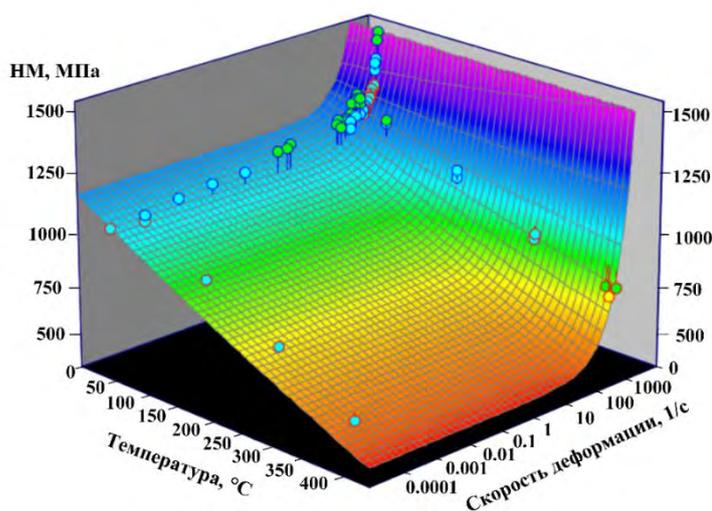


Рис. 4. Зависимость твердости от скорости деформации и температуры при деформации 8 %

Аппроксимация этих данных с помощью программного пакета TableCurve позволила получить следующие значения:  $B_1 = 3,8 \cdot 10^{-7}$ ,  $B_2 = 1,15 \cdot 10^{-3}$ ,  $A = 1,02 \cdot 10^{-3}$

и  $m=1,18$ . Диаграмма твердость – эквивалентная пластическая деформация при температуре 20°C показана на рис. 5.

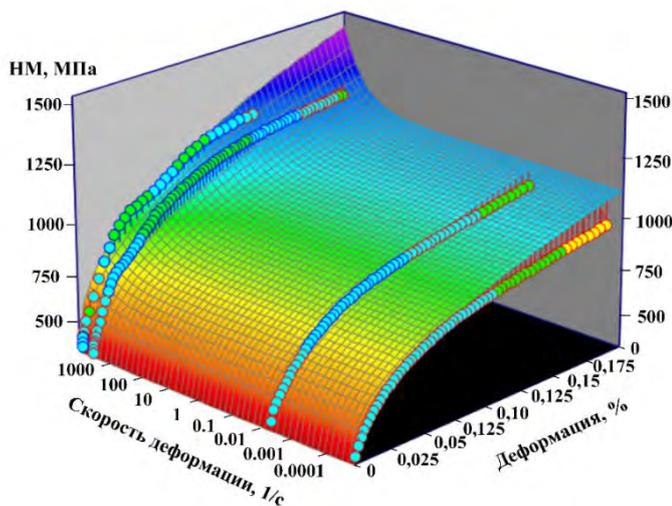


Рис. 5. Диаграмма твердость – деформация при различных уровнях скорости деформации при фиксированной температуре 20°C

Как видно, переход к устойчивым значениям практически не зависит от скорости деформации, и с ростом скорости деформации возрастают только значения коэффициентов упрочнения  $B$  и  $n$ . При этом модель достаточно хорошо описывает полученные результаты: точки, отражающие экспериментальные значения, и поверхность, описываемая уравнением (1) достаточно близки.

Также было проанализировано и влияние температуры на изменение твердости при скорости деформации около  $1000 \text{ с}^{-1}$ . В этом случае наблюдалась достаточно высокая сходимость данных в диапазоне как малых (до 0,5 %), так и больших (до 15 %) деформаций и температур от 20 до 400 °C.

Полученные результаты позволяют перейти к прогнозированию отклика материала при других режимах нагружения – одноосном растяжении и сжатии. Переход между твердостью и напряжением течения может быть осуществлен с использованием коэффициента стеснения  $C_f$ , который определяется по результатам сравнительных испытаний:

$$\sigma = C_f H M. \quad (4)$$

В данном случае представляет интерес температурная зависимость  $C_f$  и возможность перерасчета при произвольных температурах и деформациях.

При проведении экспериментов использовался цилиндрический образец по ГОСТ 1497 и разрывная машина Instron. Нагрев образцов, вырезанных из одной заготовки, осуществлялся в термокамере. Использовались две температуры 20 °C и 300 °C. На рис. 8 показана диаграмма деформирования в координатах напряжение–деформация. Используя данные для изменения твердости (рис. 4), формулу (3) и данные рис. 8 можно рассчитать значение  $C_f$ . При переходе от малых деформаций (до 2-4 %) к состоянию полной пластичности (свыше 5 %)

$C_f$  увеличивается и выходит на постоянное значение 2,81 при 20 °С и 3,23 при 300 °С.

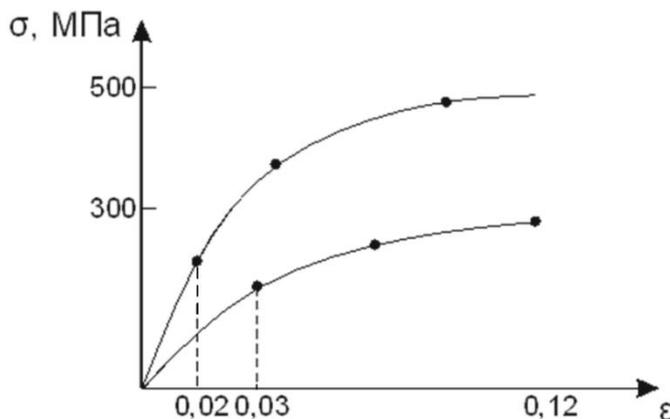


Рис. 8. Диаграмма «напряжение–деформация» для алюминиевых образцов при различных температурах

Таким образом, имея значения  $C_f$  при различных температурах и деформациях, можно использовать модель и прогнозировать отклик материала на приложенное воздействие.

**Выводы.** В работе установлен характер изменения напряжения течения металла при различных температурах (до 400 °С), деформациях (как малых – от 0,5 до 4 %, так и в состоянии полной пластичности – до 15 %) и скоростях деформации (до 2000 с<sup>-1</sup>). Показано, что полученная математическая модель пластического течения может использоваться для анализа деформирования материала при одноосном нагружении с использованием коэффициента стеснения, рассчитываемого на основании данных индентирования и статических испытаний на растяжение или сжатие металла. Полученные результаты могут использоваться при разработке режимов пластической деформации металлов (прокатке, штамповке, вытяжке и др.), для подбора оптимальных температур технологических процессов на производстве с целью снижения энергетических затрат и износа оборудования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Углов, В. В.** Современные функциональные материалы: пособие / В. В. Углов, В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2020. – 263 с.
2. **Freed, A. D.** Stress versus temperature dependent activation energies in creep. / A. D. Freed, S. V. Raj, K. P Walker // In: [microform] Prepared for the Third International Conference on Constitutive Laws or Engineering Materials. – Tucson. – 1991.

Контакты:

[7623300@gmail.com](mailto:7623300@gmail.com) (Крень Александр Петрович);  
[germanlantsman@gmail.com](mailto:germanlantsman@gmail.com) (Ланцман Герман Аркадьевич);  
[sky92033@live.com](mailto:sky92033@live.com) (Никифоров Антон Владимирович);  
[matsulevich.o.v@gmail.com](mailto:matsulevich.o.v@gmail.com) (Мацулевич Олег Владимирович);  
[5657397@gmail.com](mailto:5657397@gmail.com) (Протасеня Татьяна Анатольевна);  
[ales.kutepov@gmail.com](mailto:ales.kutepov@gmail.com) (Кутепов Алесь Юрьевич).