

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.744

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Д-р техн. наук, проф. Ю. Г. КАЛПИН, канд. техн. наук, доц. П. А. ПЕТРОВ,
магистр Н. А. БОЙКО*

*Разработка методики определения коэффициентов универсальной модели
сопротивления горячей деформации.*

*In this article the method of universal model of hot deformation resistance and its ratio
definition is presented.*

При горячей деформации, наряду с упрочнением, наблюдается и разупрочнение, связанное с возвратом и рекристаллизацией. Физическая природа возврата — аннигиляция части дислокаций, инициируемая флуктуациями, т.е. тепловыми движениями атомов вокруг их положений равновесия. Рекристаллизация заключается в зарождении и росте новых зерен за счет деформированных старых. При этом дислокационная структура старых зерен сохраняется лишь частично, большинство же дефектов исчезает.

Оба процесса связаны с диффузией атомов и протекают во времени. При этом скорость разупрочнения тем выше, чем больше упрочненность металла, и, наоборот, разупрочнение постепенно затухает по мере того, как металл разупрочняется.

Если металл длительное время деформируется с постоянной скоростью деформации, скорость упрочнения и скорость разупрочнения устанавливаются на одном уровне. Чем выше значение такой скорости деформации, тем интенсивнее протекают оба процесса (скорость упрочнения прямо связана со скоростью деформации, скоростью разупрочнения — в результате того, что напряжение текучести, соответствующее состоянию равновесия, устанавливается на более высоком уровне). При изменении скорости деформации происходит нарушение равновесия между обоими процессами и постепенное (с запозданием по отношению к скорости деформации) изменение напряжения текучести.

Недостатком многочисленных моделей напряжения текучести металлов является то, что они не описывают кривые $\epsilon \sim \sigma$ в общем виде, а являются частным случаем.

Для описания напряжения текучести при пластической деформации часто применяют сравнительно хорошо разработанные теории ползучести. Методы теории ползучести лежат в основе прочностных элементов конструкций, работающих при повышенной температуре. Теория ползучести отличается от теории пластичности, используемой при анализе процессов обработки металлов давлением, тем, что при выявлении аналитических зависимостей в соотношения напряжений и деформаций в качестве дополнительного аргумента входит время.

Известные в литературе технические теории ползучести представляют собой взаимосвязь между напряжением, деформацией и временем t или скоростью деформации в виде уравнений

$$F_1(\varepsilon_i, \sigma_i, t) = 0 \text{ (теория старения);}$$

$$F_2(\dot{\varepsilon}_i, \sigma_i, t) = 0 \text{ (теория течения);}$$

$$F_3(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_i) = 0 \text{ (теория упрочнения).}$$

В обработке металлов давлением последняя теория широко применяется. При этом зависимость напряжения текучести σ_i при определенной температуре T от деформации и скорости деформации чаще всего представляют в виде степенных функций

$$\sigma_i = \sigma_{i0} (\dot{\varepsilon}_i / \dot{\varepsilon}_{i0})^n \quad (1)$$

$$\text{или} \quad \sigma_i = \sigma_{i0}^* \varepsilon_i^n (\dot{\varepsilon}_i / \dot{\varepsilon}_{i0})^m, \quad (2)$$

где $\sigma_{i0}, \varepsilon_{i0}, \sigma_{i0}^*, n, m$ — коэффициенты, являющиеся функцией температуры.

Однако такой подход к определению напряжения текучести (представление напряжения текучести в виде функции нескольких переменных) оправдан только в тех случаях, когда скорость деформации на протяжении всего процесса штамповки остается постоянной или почти постоянной. При переменной скорости деформации описать напряжение текучести можно на основе представления о нем как о функционале пути деформирования $\varepsilon_i = \varepsilon_i(t)$ и $\dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_i(t)$, т. е. одним и тем же значениям переменных $\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, t, T$ могут соответствовать различные значения σ_i , если реализуются разные пути деформирования.

Используя чисто феноменологический подход, можно построить модель напряжения текучести металла. Представим дифференциал напряжения текучести $d\sigma_i$ в момент времени t в виде суммы [1, 2]

$$d\sigma_i = d\sigma_{i1} + d\sigma_{i2}, \quad (3)$$

где $d\sigma_{i1}$ — изменение напряжения текучести в результате упрочнения металла; $d\sigma_{i2}$ — изменение напряжения текучести, учитывающее разупрочнение из-за возврата и динамической рекристаллизации, протекающих при температуре горячей деформации.

Подобный подход к определению напряжения текучести при горячем деформировании впервые использован М.А.Большаниной, а также А.И.Целиковым и В.А.Персиянцевым. Работоспособность модели зависит от того, насколько функции, описывающие составляющие $d\sigma_{i1}$ и $d\sigma_{i2}$, отвечают реальному поведению металла. Отметим, что модель будет удовлетворять требованию универсальности, т.е. работать при любых путях деформирования, если величины $d\sigma_{i1}$ и $d\sigma_{i2}$ записать в виде функций напряжения текучести, скорости деформации и приращения времени. Другими словами, приращение напряжения текучести в данный момент времени может зависеть только от состояния металла и от воздействия на него в этот момент времени. В выражение $d\sigma_i$ не может в явном виде входить накопленная деформация ε_i , так как одно и то же состояние металла, т.е. одно и то же σ_i , при горячей деформации может соответствовать различным значениям ε_i при разных путях деформирования. Модели М.А.Большаниной, А.И.Целикова и В.А.Персиянцева отвечают этим требованиям. Однако они не учитывают механизмов деформации, описываемых моделями вязкого течения. К таким механизмам относятся, например, межзеренное проскальзывание, сопровождаемое аккомодацией границ зерен. Универсальная модель, включающая такой механизм, имеет большое число коэффициентов, которые следует определять экспериментальным путем.

При описании математических моделей поведения металлов при холодной и горячей деформации принято пользоваться простейшими схемами (рис. 1) или их комбинациями;

при последовательном соединении элементов модели складываются деформации, контролируемые каждым из элементов, при параллельном — напряжения.

Схема	Математическое описание
	$\sigma_i = E \varepsilon_i$
	$\sigma_i = \sigma_s$
	$\sigma_i = \mu \dot{\varepsilon}_i$
	$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$ - с упрочнением
	$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$ - с разупрочнением
	$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$ - с упрочнением и разупрочнением

Рис. 1. Простейшие реологические модели

Модель, представляющаяся нам универсальной, состоит из следующих элементов. Элемент 1 описывает внутризеренную деформацию, сопровождающуюся упрочнением и разупрочнением в соответствии с уравнением (4); элемент 2 — межзеренную деформацию и другие механизмы вязкого течения. При этом коэффициент вязкости μ может изменяться, если при деформации зерно измельчается, т.е. $\mu = \mu(\varepsilon_i)$. Поскольку та и другая деформации складываются, элементы соединены последовательно. Так как межзеренная деформация невозможна без аккомодации границ, осуществляющейся в основном трансляцией дислокаций, параллельно элементу 2 следует включить пластический элемент 3, описывающий наличие начального (порогового) напряжения σ_0 .

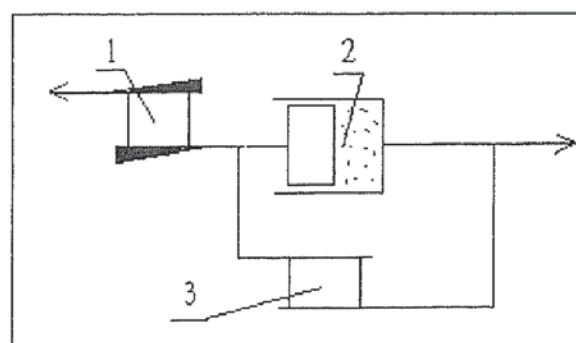


Рис. 2. Универсальная модель

Модель будет удовлетворять требованию универсальности, т.е. работать при любых путях деформирования, если величины $d\sigma_{i1}$ и $d\sigma_{i2}$ записать в виде функций напряжения текучести, скорости деформации и приращения времени.

При деформировании с большой скоростью из (3) следует, что

$$\sigma_i \approx \sigma_{i1} = \sigma_0 + A\varepsilon_i^n \quad (4)$$

или

$$\sigma_i \approx \sigma_{i1} = \sigma_0 + (\sigma_{np} - \sigma_0)(1 - \exp(-c\varepsilon_i)), \quad (5)$$

где $A, n, \sigma_{np}, \sigma_0, c$ — коэффициенты.

Дифференцируем (2)

$$d\sigma_i \approx d\sigma_{i1} = c(\sigma_{np} - \sigma_0) \exp(-c\varepsilon_i) d\varepsilon_i. \quad (6)$$

Выразив величину ε_i из (5) и подставив ее в (6), получим

$$d\sigma_{i1} = c(\sigma_{np} - \sigma_i) d\varepsilon_i. \quad (7)$$

В таком виде эти выражения можно распространить на случаи деформирования с любой скоростью.

Значение $d\sigma_{i2}$ примем в виде

$$d\sigma_{i2} = -g(\sigma_i - \sigma_0) dt, \quad (8)$$

где g — коэффициент.

Таким образом, для определения напряжения текучести в любой момент времени в (3) подставляем (7) и (8)

$$d\sigma_i = c(\sigma_{np} - \sigma_0) d\varepsilon_i - g(\sigma_i - \sigma_0) dt. \quad (9)$$

Для определения числовых коэффициентов, входящих в универсальную модель, желательно подобрать такие виды испытаний, по результатам которых можно было бы находить лишь часть из них, переходя затем к другим видам. Ниже изложен один из вариантов подобной методики.

Как показано ранее (рис. 2), элемент 1 универсальной модели можно представить формулой (9), т.е.

$$d\sigma_{i1} = (\sigma_{np} - \sigma_0) d\varepsilon_{i1} - g(\sigma_{i1} - \sigma_0) dt. \quad (10)$$

Элементу 2 соответствует $\sigma_{i2} = \mu \dot{\varepsilon}_{i2}$, а элементу 3 — $\sigma_{i3} = \sigma_0$. Учтем, что $\sigma_{i1} = \sigma_{i2} + \sigma_{i3} = \sigma_i$, $\varepsilon_i = \varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}$, $\dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_{i1} + \dot{\varepsilon}_{i2}$. Отсюда следует

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = c(\sigma_{np} - \sigma_i) \left(\dot{\varepsilon}_i - \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\mu} \right) - g(\sigma_i - \sigma_0). \quad (11)$$

Рассмотрим случай деформирования при постоянной скорости деформации. Решение уравнения (9)

$$\sigma_i = \frac{2k_1(1 - e^{-k_2 t})}{k_2 + k_3 + (k_2 - k_3)e^{-k_2 t}}, \quad (12)$$

где $k_1 = c(\sigma_{np} - \sigma_0)\dot{\varepsilon}_i$; $k_2 = \sqrt{k_3^2 - 4ck_1/\mu}$; $k_3 = c\dot{\varepsilon}_i + c(\sigma_{np} - \sigma_0)/\mu + g$.

Воспользуемся данными по сопротивлению деформированию сплава ВТЗ-1 с глобулярной структурой при температуре 930°C (рис. 3).

Обработка их дает следующие значения коэффициентов уравнения (9): $c = 5$; $g = 0,01$ с⁻¹; $\sigma_{np} = 200$ МПа; $\sigma_0 = 0,5$ МПа; $\mu = 100000$ МПа·с. Попробуем определить величину

скорости деформации, при которой можно пренебречь как разупрочнением металла, так и вязкими механизмами течения. Обработка их дает следующие значения коэффициентов уравнения (9): $c = 5$; $g = 0,01 \text{ с}^{-1}$; $\sigma_{\text{нр}} = 200 \text{ МПа}$; $\sigma_0 = 0,5 \text{ МПа}$; $\mu = 100\,000 \text{ МПа} \cdot \text{с}$. Попытаемся определить величину скорости деформации, при которой можно пренебречь как разупрочнением металла, так и вязкими механизмами течения.

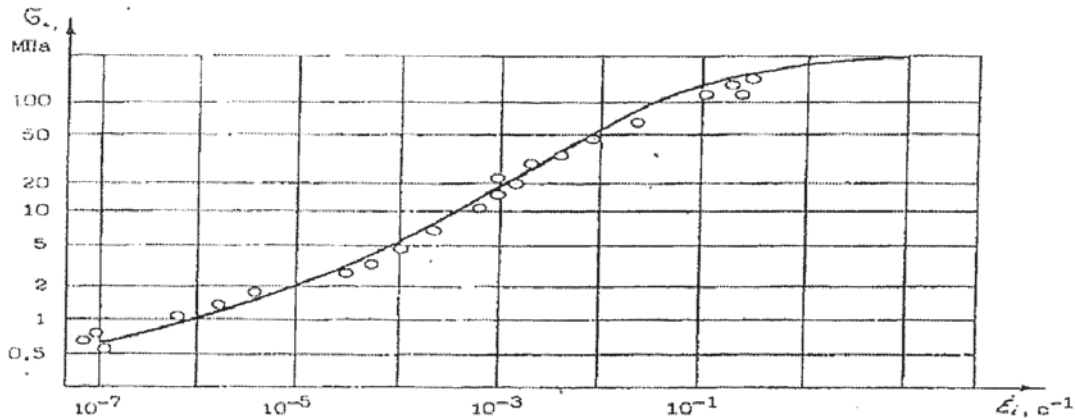


Рис. 3. Зависимость напряжения течения сплава ВТЗ-1 (глобулярная структура) от скорости деформации при $T = 930 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (о — эксперимент, — расчет)

В таблице представлены результаты расчета сопротивления деформации по формулам (9), (12) и по экспоненциальной аппроксимации кривой упрочнения (3). По этим данным построены графики (рис.4).

Таблица

Расчет напряжения текучести сплава ВТЗ-1 при $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при постоянной скорости деформации

ϵ_i	Формула (13)	Формула (9)			Формула (12)		
		$\dot{\epsilon}_i, \text{с}^{-1}$			$\dot{\epsilon}_i, \text{с}^{-1}$		
		0,001	0,1	10	0,001	0,1	10
0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,2	126,4	63,3	125,4	126,4	43,2	124,8	126,4
0,4	172,9	66,5	170,6	172,9	43,8	170,0	172,9
0,6	190,0	66,7	186,9	190,0	43,8	186,4	190,0
0,8	196,3	66,7	192,8	196,3	43,8	192,5	196,3
1,0	198,6	66,7	194,9	198,6	43,8	194,7	198,6

Как видно из рис. 4 при скоростях деформации $0,1 \div 10 \text{ с}^{-1}$ расхождение результатов полученных по всем формулам незначительно и такие скорости можно использовать для определения значений $\sigma_{\text{нр}}$, σ_0 , c , подобно тому, как это делается при нахождении параметров кривых упрочнения в условиях холодной деформации.

Рассмотрим теперь случай деформирования с периодической разгрузкой. Прервем процесс нагружения при напряжении σ_{max} . За время t_p разгрузки и повторного нагружения до возобновления пластической деформации, согласно (8), снижение напряжения текучести составит

$$\Delta\sigma_i = (\sigma_{\max} - \sigma_0)(1 - e^{-g t}). \quad (13)$$

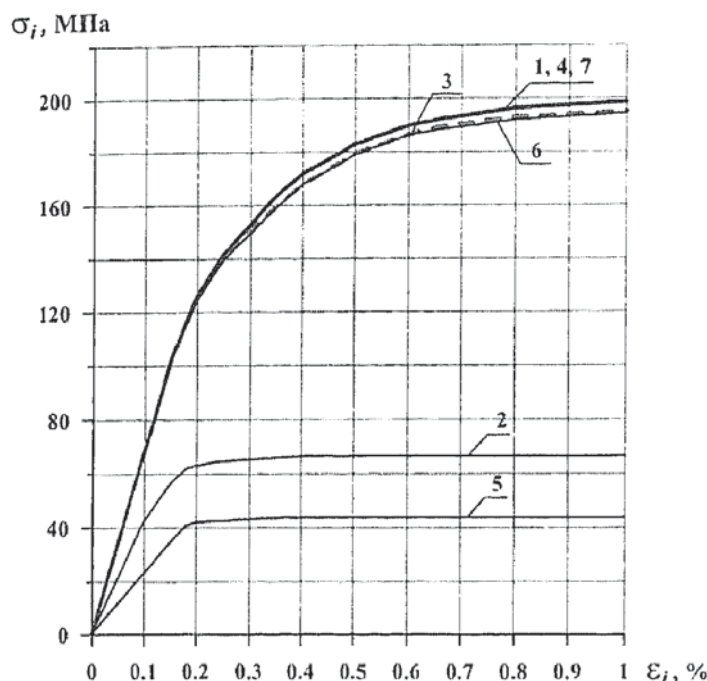


Рис. 4. Изменение напряжения текучести от деформации при скоростях деформации от 0,1 до 10 с⁻¹: (1 — по формуле (13), 2 — по формуле (9) при $\dot{\epsilon}_i = 0,001$ с⁻¹, 3 — по формуле (9) $\dot{\epsilon}_i = 0,1$ с⁻¹, 4 — по формуле (9) при $\dot{\epsilon}_i = 10$ с⁻¹, 5 — по формуле (12) при $\dot{\epsilon}_i = 0,001$ с⁻¹, 6 — по формуле (12) при $\dot{\epsilon}_i = 0,1$ с⁻¹, 7 — по формуле (9) при $\dot{\epsilon}_i = 10$ с⁻¹).

Поставив ряд опытов с различными значениями $\sigma_{\max}$ и t_p , можно определить значение g из (14).

Наконец, величину μ определяем из любого иного эксперимента.

Таким образом, коэффициенты, входящие в универсальную модель, следует определять в 3 этапа.

1. Испытания на растяжение или сжатие при средних скоростях деформации от 0,1÷1,0 с⁻¹ и выше (находим σ_{np} , σ_0 , c).

2. Испытания на растяжение или сжатие с периодической разгрузкой и паузой различной продолжительности (находим g).

3. Любой иной эксперимент (например, на сжатие на тихоходном прессе при переменной скорости деформации или выдержка цилиндрического образца под постоянной нагрузкой на гидравлическом прессе).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целиков А. И., Персиянцев В. А. Учет влияния наклепа на сопротивление деформации в зарекристаллизационных процессах // Прокатные станы и технология прокатки. — МВТУ, 1957. — № 80.
2. Соколов Л. Н., Икорский В. К. Зависимости σ - ϵ - t при горячей пластической деформации металлов // Известия вузов. Черная металлургия, 1979. — № 2.