

## О существовании термомеханической поверхности материалов при неизотермическом повторно-простом нагружении

Б. И. Ковальчук<sup>а</sup>, А. А. Лебедев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

<sup>б</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Анализируются результаты экспериментальных исследований деформирования сталей различных марок при растяжении с промежуточными разгрузками, во время которых изменялась температура. Показано, что указанный процесс деформирования не для всех материалов описывается с помощью гипотезы существования термомеханической поверхности. Предложено уравнение состояния материалов при повторно-простом нагружении в условиях переменных температур.*

**Ключевые слова:** повторно-простое нагружение, переменные температуры, термомеханическая поверхность, уравнение состояния.

При построении несвязанной теории неизотермической пластичности во многих работах, например [1–3] и др., используется выдвинутое Людвигом предположение о существовании механического уравнения состояния в виде

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, T) \quad \text{или} \quad \sigma = \sigma(\varepsilon^p, T), \quad (1)$$

согласно которому для материалов, нечувствительных к скорости деформирования, напряженное состояние при совместном нагреве (охлаждении) и одноосном нагружении зависит только от текущих значений деформации и температуры. В пространстве  $\sigma - \varepsilon^p - T$  уравнению (1) соответствует поверхность  $F(\sigma, \varepsilon^p, T) = 0$ , которую называют поверхностью неизотермического пластического деформирования [2], или термомеханической поверхностью [3] (рис. 1). Процессы деформирования при одновременном изменении  $\sigma$  и  $T$  изображаются в виде пространственных кривых, расположенных на этой поверхности.

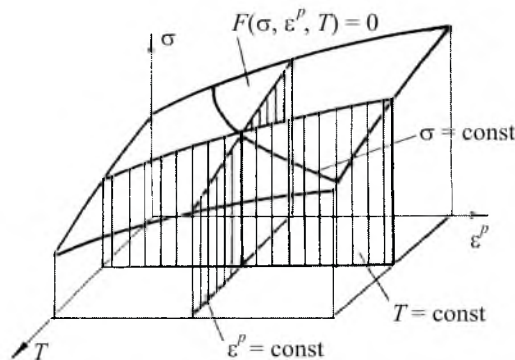


Рис. 1. Термомеханическая поверхность.

Как следует из уравнения состояния (1), приращение пластической деформации может быть записано в виде

$$d\varepsilon^P = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial T} dT. \quad (2)$$

Обобщением соотношения (1) на случай сложного напряженного состояния является уравнение состояния

$$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i^P, T), \quad (3)$$

где  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i^P$  – интенсивность напряжений и пластических деформаций соответственно.

Использование концепции термомеханической поверхности существенно упрощает построение физических уравнений теории пластичности и решение инженерных задач. Однако класс процессов, для которых справедливы уравнения (1) и (3), не выяснен.

В работе [4] отмечалось, что в соотношении (3) зависимость напряжений от температуры в общем случае является функциональной:

$$\sigma_i = \Phi\{\xi, T(\xi)\}_{\xi=0}^{\varepsilon_i},$$

где  $\xi$  – текущее значение интенсивности деформации.

И. А. Биргером [5] предложено уравнение состояния

$$d\varepsilon^P = \frac{2}{3}[F_\sigma(\sigma, T)d\sigma + F_T(\sigma, T)dT],$$

которое не предусматривает обязательное существование единой поверхности неизотермического пластического деформирования. Здесь функция  $F_\sigma(\sigma, T)$  определяется по обычным кривым растяжения при  $T = \text{const}$ , а функция  $F_T(\sigma, T)$  – по кривым растяжения при  $\sigma = \text{const}$  и повышающейся температуре, что равносильно принятию гипотезы о существовании двух поверхностей, которые определяют пластические деформации при любом активном процессе нагружения.

Экспериментальные исследования уравнений состояния в условиях неизотермического нагружения весьма ограничены.

Опытные данные подтверждают наличие термомеханической поверхности для титанового сплава при  $T = 243...343$  К [6] и для сплава Д16Т при  $T = 293...623$  К [7]. Результаты экспериментальных исследований нержавеющей стали при повышенных температурах [8] не согласуются с расчетными данными, полученными с использованием уравнения состояния (1). Из работы [7] следует, что соотношение (2) не является полным дифференциалом. В связи с этим в [9] предложено рассматривать термомеханическую поверхность в пространстве  $\sigma - \chi - T$ , где параметр упрочнения  $\chi = \chi(\sigma, T)$ .

Практически не изучены уравнения состояния материалов в условиях неизотермического нагружения при низких температурах.

В настоящей работе рассмотрены результаты экспериментального исследования упрочнения конструкционных материалов в условиях повторно-простого нагружения при изменяющихся температурах, когда первоначальное и повторное нагружение проводились по одной и той же траектории, но при различных температурах (температурно-дифференциальный способ нагружения). Цель исследования – проверка гипотезы существования термомеханической поверхности для данного класса нагружений при низких температурах и установление соответствующего уравнения состояния материалов. Отметим, что нагружение в температурно-дифференциальных условиях характерно для работы многих криогенных систем, поэтому его изучение имеет большое практическое значение.

Исследовали сплошные цилиндрические ( $D = 8$  мм) и трубчатые ( $D = 26$  мм;  $\delta = 0,5$  мм) образцы в условиях одноосного растяжения в диапазоне температур 77...293 К на установке СНТ-5ПМ [10] и универсальной машине BLW-30, снабженной специальной холодильной камерой. Деформации трубчатых образцов измеряли электромеханическим тензометром [11], удлинение цилиндрических образцов регистрировали с помощью специального приспособления [12].

В качестве объекта исследования использовали малоуглеродистую сталь 20, среднеуглеродистые стали 45 и 50, легированные стали X и ЭП718, а также специальную сталь СП для судостроения. Из сталей 45, 50 и X были изготовлены трубчатые образцы, из ЭП718 и СП – сплошные цилиндрические. Стали 45 и 50 испытывали в отожженном состоянии, остальные – в состоянии поставки.

При температурно-дифференциальном методе испытаний образцы деформировали при температуре  $T_1$  на ступень  $\Delta\varepsilon^p = 2...3,5\%$ , затем разгружали, путем охлаждения или отогрева изменяли температуру на  $T_2$  и снова проводили деформирование на  $\Delta\varepsilon^p$  и т.д.

На рис. 2 представлены результаты испытания стали 50 в условиях изотермического и температурно-дифференциального нагружения.

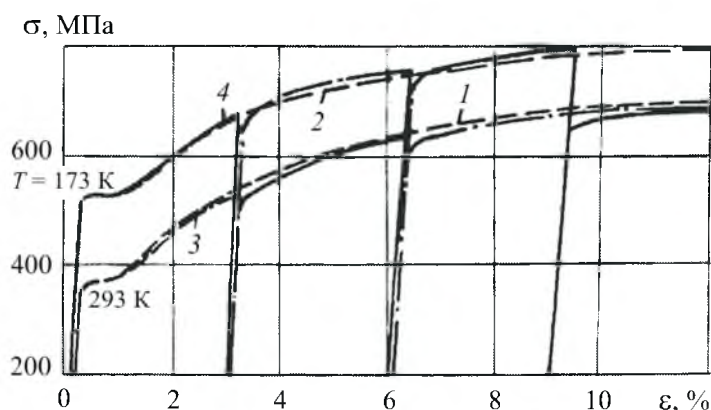


Рис. 2. Кривые деформирования стали 50 в условиях изотермического (1, 2) и температурно-дифференциального (3, 4) нагружения.

Согласно уравнению состояния (1) напряженное состояние определяется конечными значениями  $\varepsilon^P$  и  $T$ . Поэтому при наличии термомеханической поверхности участки кривых деформирования при температурно-дифференциальном нагружении должны совпадать с кривыми при изотермическом деформировании при соответствующих температурах. Как видно, расхождение между указанными кривыми не превышает 5%. Аналогичные результаты получены при испытании сталей 45 и X.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о существовании для исследованных материалов термомеханической поверхности и адекватности уравнения состояния (1).

Из рис. 2 следует, что необходимым условием существования термомеханической поверхности является равенство

$$\Delta_T \sigma(\varepsilon^P) = \sigma(\varepsilon^P, T_1) - \sigma(\varepsilon^P, T_2), \quad (4)$$

где  $\Delta_T \sigma(\varepsilon^P)$  – упрочнение (разупрочнение), вызванное изменением только температуры после определенного уровня предшествующей пластической деформации;  $\sigma(\varepsilon^P, T_1)$ ,  $\sigma(\varepsilon^P, T_2)$  – сопротивление пластическому деформированию в изотермических условиях соответственно при  $T_1 = \text{const}$  и  $T_2 = \text{const}$ .

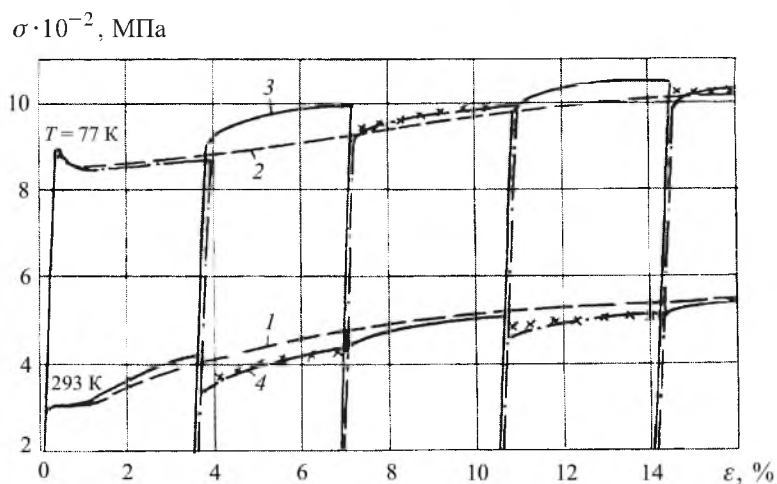
На рис. 3 и 4 представлены результаты исследований, полученные на малоуглеродистой стали 20 и легированной стали ЭП718, деформационное упрочнение которых, характеризуемое параметром  $D = d\sigma/d\varepsilon$ , при комнатной и низких температурах существенно различается.

Поскольку деформационное упрочнение стали 20 при  $T = 293$  К значительно выше (особенно при  $\varepsilon^P \geq 6\%$ ), чем при низких температурах, участки кривой растяжения 3 (рис. 3), соответствующие  $T = 77$  К и следующие после деформации при  $T = 293$  К, лежат выше кривых изотермического деформирования при  $T = 77$  К (кривые 2). В то же время участки кривой 4 (рис. 3), соответствующие  $T = 293$  К и полученные после деформирования при  $T = 77$  К, находятся ниже кривой изотермического деформирования при  $T = 293$  К. По мере уменьшения разницы между модулями упрочнения при комнатной и низких температурах с увеличением пластической деформации кривые, полученные при переменных температурах, приближаются к кривым, полученным при изотермическом деформировании (рис. 3).

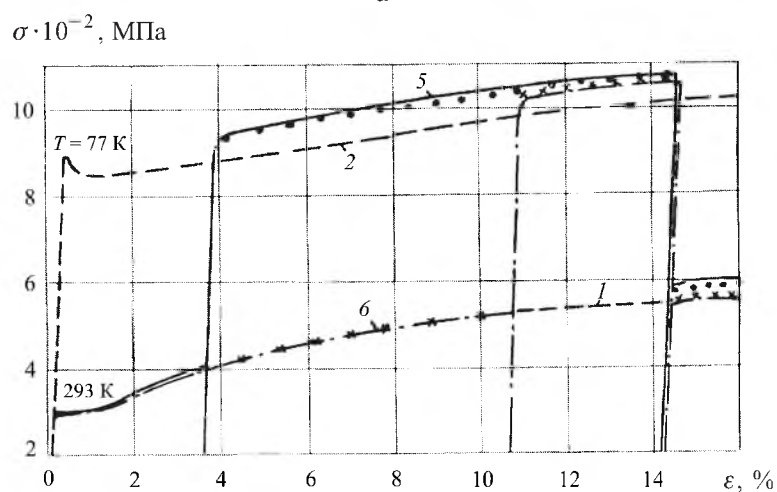
Модуль упрочнения стали ЭП718, в отличие от стали 20, при низкой температуре выше, чем при комнатной (рис. 4). С увеличением деформации эта разница растет. В результате пластическая деформация при комнатной температуре понижает участки кривых 3 и 4, соответствующие температуре 77 К (рис. 4).

Представляют интерес данные, полученные при испытании используемой в судостроении легированной стали. Из рис. 5, на котором показаны диаграммы растяжения в условных напряжениях, видно, что в области равномерной деформации ( $\varepsilon < 8\%$ ), где модули упрочнения стали при  $T = 293$  и 77 К практически не отличаются, участки кривых при темпера-

турно-дифференциальном нагружении совпадают с участками кривых при изотермическом деформировании. Однако в результате того, что предельные равномерные деформации стали при  $T = 293$  К меньше, чем при  $T = 77$  К, и темп падения сопротивления образца в закритической области при комнатной температуре выше, чем при низкой, участки диаграмм 3 и 4 при  $\varepsilon \geq 8\%$  и  $T = 293$  К начинают заметно отклоняться от кривой 1 при изотермическом деформировании (рис. 5).



а



б

Рис. 3. Кривые деформирования стали 20 в условиях изотермического (1, 2) и температурно-дифференциального (3–6) нагружения при постоянном (а) и переменном (б) шаге по деформациям. (Здесь и на рис. 4: точки – результаты расчетов по уравнениям (8) и (9).)

Результаты исследования показывают, что упрочнение сталей 20 и ЭП718 в условиях температурно-дифференциального нагружения не может быть описано на основе представлений о термомеханической поверхности  $F(\sigma, \varepsilon^p, T) = 0$ .

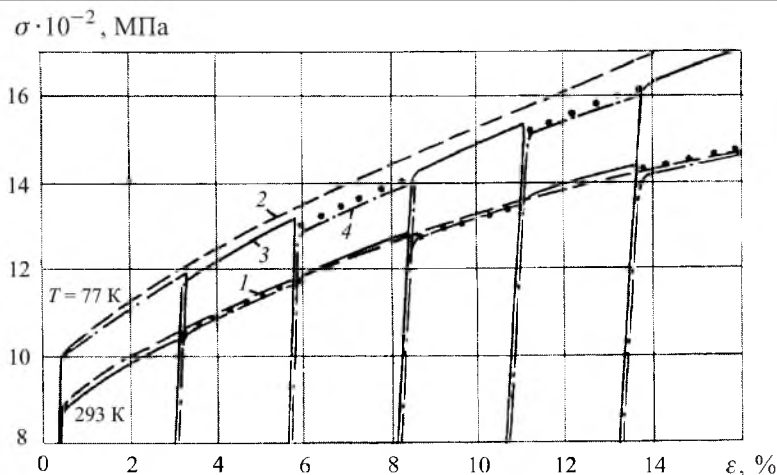


Рис. 4. Кривые деформирования стали ЭП718 в условиях изотермического (1, 2) и температурно-дифференциального (3, 4) нагружения.

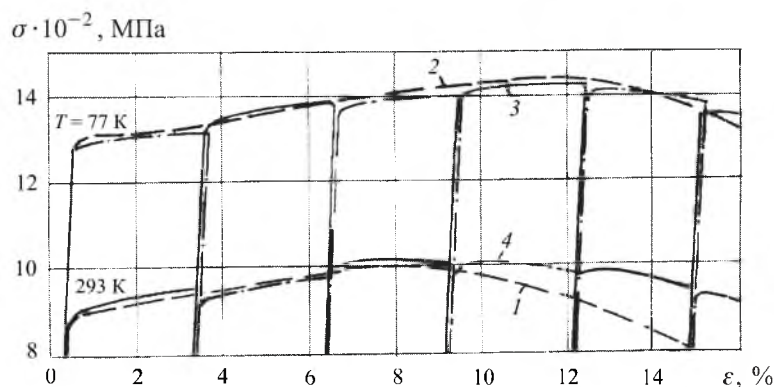


Рис. 5. Кривые деформирования стали СП в условиях изотермического (1, 2) и температурно-дифференциального (3, 4) нагружения.

На рис. 6 схематически показано расположение траекторий, соответствующих различным программам нагружения стали 20 (рис. 3), относительно поверхности  $F(\sigma, \epsilon^p, T) = 0$ , которая является геометрическим местом кривых, полученных при изотермическом деформировании. Как видно, история температурно-силового воздействия оказывает значительное влияние на упрочнение стали. Траектории 3 и 5 лежат выше поверхности изотермического деформирования  $F(\sigma, \epsilon^p, T) = 0$ , а траектория 4 – ниже этой поверхности. В точке А одним и тем же конечным значениям  $\epsilon'$  и  $T'$  в зависимости от траектории процесса соответствуют три значения напряжений:  $\sigma_1$  (изотермическое деформирование при  $T_1$ ),  $\sigma_2$  (траектория 3),  $\sigma_3$  (траектория 5).

Из приведенных данных следует, что для рассмотренного класса нагружений упрочнение стали 20 не может быть описано с использованием двух функций, установленных по кривым растяжения при различных постоянных температурах и при постоянных напряжениях и повышающейся температуре, т.е. на основании концепции двух поверхностей для материалов, не имею-



щих единой термомеханической поверхности [5]. Это связано с тем, что при определении поверхности, соответствующей деформированию при  $\sigma = \text{const}$  и повышающейся температуре, не учитывается история процесса, при котором было достигнуто заданное значение  $\sigma$ .

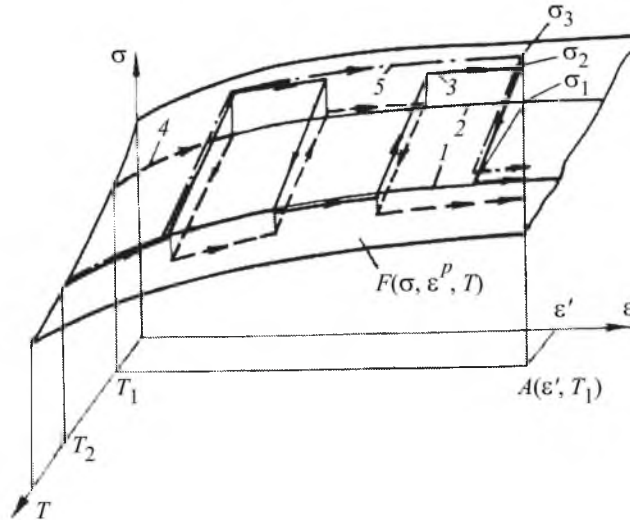


Рис. 6. Схема расположения траекторий, соответствующих различным программам нагружения стали 20 (рис. 3), относительно поверхности изотермического деформирования.

Экспериментальные данные, полученные в температурно-дифференциальных условиях, использовались при построении уравнения состояния материалов для общего случая неизотермического нагружения.

Анализ результатов (рис. 2–4) показал, что участки кривых деформирования при различных программах испытаний, расположенные в одной плоскости  $T = \text{const}$ , могут с достаточной степенью точности рассматриваться как конгруэнтные с участком соответствующей изотермической кривой.

Это дает основание записать выражение для приращения напряжения вследствие деформационного упрочнения при  $T = \text{const}$  в виде

$$d'\sigma = \frac{\partial \sigma_{\text{н}}(\varepsilon^p, T)}{\partial \varepsilon^p} d\varepsilon^p, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{н}}(\varepsilon^p, T)$  – функция, определяемая по кривым изотермического растяжения при различных температурах.

Опытные данные свидетельствуют, что приращение сопротивления материала в результате изменения температуры  $\Delta_T \sigma$  при  $\varepsilon^p = \text{const}$  в общем случае зависит от степени предварительной пластической деформации и может быть представлено соотношением

$$\Delta_T \sigma(\varepsilon^p) = \omega(\varepsilon^p) \Delta_T \sigma_s, \quad (6)$$

где  $\Delta_T \sigma_s$  – приращение исходного предела текучести при изменении температуры на  $\Delta T$ ;  $\omega$  – некоторая функция пластической деформации, определяемая экспериментально.

Полагая, что в заданном температурном диапазоне функция  $\omega$  является инвариантной к температуре, приращение сопротивления материала вследствие изменения температуры запишем следующим образом:

$$d''\sigma = \omega(\varepsilon^P) d\sigma_s(T).$$

При одновременном изменении пластической деформации и температуры получим

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma_n(\varepsilon^P, T)}{\partial \varepsilon^P} d\varepsilon^P + \omega(\varepsilon^P) d\sigma_s(T). \quad (7)$$

Для случая температурно-дифференциального нагружения уравнение (7) может быть проинтегрировано. На произвольном участке деформирования при  $T = \text{const}$  имеем

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_n(\varepsilon^P, T) - \sigma_n(\varepsilon_n^P, T), \quad (8)$$

где  $\sigma_n$ ,  $\varepsilon_n^P$  – напряжение и пластическая деформация, соответствующие начальной точке участка деформирования при  $T = \text{const}$ .

Зависимость сопротивления материала от температуры  $T$  при  $\varepsilon^P = \text{const}$  имеет вид

$$\sigma = \sigma(\varepsilon_k^P, T_1) + \omega(\varepsilon^P)[\sigma_s(T) - \sigma_s(T_1)], \quad (9)$$

где  $T_1$ ,  $\sigma(\varepsilon_k^P, T_1)$  – соответственно температура и конечное напряжение на предшествующем участке деформирования.

На рис. 7 представлены зависимости  $\omega(\varepsilon^P)$  для сталей 20, ЭП718 и СП по кривым деформирования 3 (рис. 3–5), полученным при изменении температуры по режиму  $293 \rightarrow 77 \rightarrow 293$  К, для сталей 45, 50 и Х – при изменении температуры в диапазоне  $293 \dots 173$  К. При расчете зависимости  $\omega(\varepsilon^P)$  для стали 20, имеющей зуб текучести при температурах 77 и 173 К, использовали нижний предел текучести. Как видно, для всех исследованных материалов, кроме стали ЭП718, функция  $\omega(\varepsilon^P)$  является убывающей, что свидетельствует об уменьшении влияния температуры на сопротивление стали с увеличением уровня предварительной пластической деформации. При этом зависимости  $\omega(\varepsilon^P)$  могут быть аппроксимированы степенной функцией  $\omega = A(\varepsilon^P)^m$ . Чтобы найти константы  $A$  и  $m$ , необходимо определить вызванное температурой изменение предела текучести материала в исходном состоянии и после двух уровней пластической деформации. Для материалов, деформирование которых при переменных температурах описывается термомеханической поверхностью, на основании (4) и (6) имеем



$$\omega(\varepsilon^p) = \frac{\sigma(\varepsilon^p, T_1) - \sigma(\varepsilon^p, T_2)}{\Delta T \sigma_s} \quad (10)$$

В случае независимости деформационного упрочнения материала от температуры кривые растяжения при различных уровнях температуры будут конгруэнтными, в результате согласно соотношению (10) получим  $\omega = 1$ .

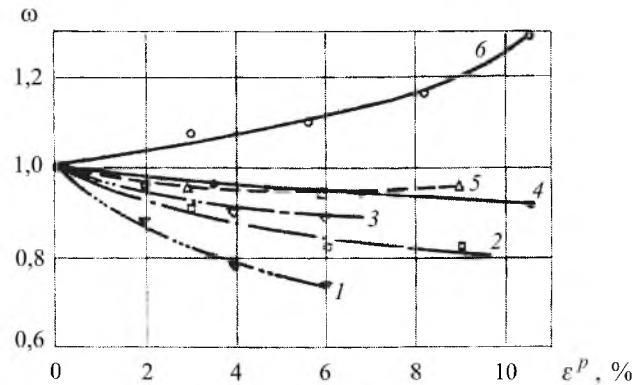


Рис. 7. Зависимость параметра температурного упрочнения от уровня предварительной пластической деформации: 1 – сталь 45; 2 – сталь 50; 3 – сталь Х; 4 – сталь 20; 5 – сталь СП; 6 – сталь ЭП718.

Уравнения (8) и (9) использовали для расчета кривых деформирования сталей 20 и ЭП718, соответствующих разным программам нагружения. Влиянием температуры и пластической деформации на модуль упругости пренебрегали. Значения функции  $\omega(\varepsilon^p)$  находили по кривым, представленным на рис. 7. При этом программы нагружения, по которым строили кривые  $\omega(\varepsilon^p)$ , не совпадали с расчетными. Как видно из рис. 3 и 4, предложенное уравнение состояния хорошо описывает упрочнение материалов при пластическом деформировании в температурно-дифференциальных условиях с промежуточными разгрузками. Отклонение расчетных данных от опытных по напряжениям не превышает 3%.

Обобщением соотношения (7) на случай простого нагружения при сложном напряженном состоянии является уравнение

$$d\sigma_i = \frac{\partial \sigma_i(\varepsilon_i^p, T)}{\partial \varepsilon_i^p} d\varepsilon_i^p + \omega(\varepsilon_i^p) d\sigma_{is}(T), \quad (11)$$

где  $\sigma_{is}$  – интенсивность напряжений, соответствующая пределу текучести;  $\varepsilon_i^p$  – интенсивность пластических деформаций.

В диапазоне температур, где при изотермическом нагружении сохраняется инвариантность кривой  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$  к виду напряженного состояния, зависимость (11), согласно постулату изотропии Ильюшина, также будет инвариантна к ориентации траектории нагружения в пространстве напряжений.

## Выводы

1. Показано, что гипотеза существования термомеханической поверхности в виде  $F(\sigma, \varepsilon^p, T) = 0$  при повторно-простом нагружении в условиях переменных температур для многих материалов может не выполняться.

2. Предложено уравнение состояния, описывающее деформационное упрочнение материалов при переменных температурах.

3. Адекватность уравнения подтверждена опытами при нагружении в температурно-дифференциальных условиях, когда изменение температуры происходит при промежуточных разгрузках.

## Резюме

Аналізуються результати експериментальних досліджень деформування сталей різних марок при розтягуванні з проміжними розвантаженнями, під час яких змінювалася температура. Показано, що даний процес деформування не для всіх матеріалів описується за допомогою гіпотези існування термомеханічної поверхні. Запропоновано рівняння стану матеріалу для повторно-простого навантажування в умовах змінних температур.

1. *Ленский В. С., Ломакин В. А.* Деформационная теория термопластичности // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – Киев: Наук. думка, 1970. – Вып. 10. – С. 37 – 49.
2. *Термопрочность* деталей машин / Под ред. И. А. Биргера. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
3. *Шевченко Ю. Н.* Термопластичность при переменных нагружениях. – Киев: Наук. думка, 1970. – 288 с.
4. *Ильющин А. А., Ленский В. С.* О соотношениях и методах современной теории пластичности // Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука, 1975. – С. 240 – 255.
5. *Биргер И. А.* Теория пластического течения при неизотермическом нагружении // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – № 1. – С. 193 – 196.
6. *Никитенко А. Ф., Торшинов Н. Г.* Экспериментальная проверка гипотезы существования термомеханической поверхности для титанового сплава // Динамика сплошной среды. – 1976. – Вып. 25. – С. 92 – 101.
7. *Шевченко Ю. Н., Терехов Р. Г.* Экспериментальная проверка гипотезы существования термомеханической поверхности в теории пластичности // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – Киев: Наук. думка, 1973. – С. 43 – 47.
8. *Willhelm A. C. and Kattus J. R.* Stress-strain characteristics of metals under conditions of transient heating and loading // Proc. ASTM. – 1963. – 63. – P. 613 – 619.

9. *Ранецкий Б., Савчук А.* Температурные эффекты в пластичности. Ч. 1. Связанная теория // Проблемы теории пластичности и ползучести. – М.: Мир, 1979. – С. 203 – 220.
10. *Ковальчук Б. И.* Об экспериментальном исследовании законов упруго-пластического деформирования и разрушения материалов в условиях сложного напряженного состояния // Механические испытания конструкционных материалов при криогенных температурах. – Киев: Наук. думка, 1981. – С. 43 – 62.
11. *Ковальчук Б. И., Лебедев А. А., Ламашевский В. П.* Тензомер для измерения линейных и угловых деформаций трубчатых образцов в условиях нормальной и низких температур // Завод. лаб. – 1973. – № 8. – С. 1008 – 1010.
12. *Руденко В. Н.* Устройство для записи диаграмм деформирования при испытаниях на растяжение // Пробл. прочности. – 1971. – № 8. – С. 118 – 120.

Поступила 06. 04. 2005