

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ
ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э-110
ПРИ ПРОСТОМ И СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ**

*И. Э. Гинзбург¹, В. М. Жигалкин¹, В. А. Котрехов²,
С. Ю. Заводчиков², А. Ф. Лосицкий², О. М. Усольцева¹,
Ю. П. Шевнин²*

¹*Институт горного дела СО РАН, 630091 Новосибирск*

²*ПО Чепецкий механический завод, 427600 Глазов*

Цель экспериментов, результаты которых приведены ниже, — исследование характера упругопластического деформирования циркониевого сплава Э-110 (Zr + 1 % Nb) при двухосном растяжении, создаваемом в тонкостенном трубчатом образце осевой силой и внутренним давлением в условиях простого и сложного нагружения при комнатной температуре. Особое внимание уделено изучению свойств в условиях сложного нагружения, когда в одном из главных направлений тензора напряжений осуществлялась частичная разгрузка [1–5].

Приведены результаты экспериментального изучения трансформации фронтальной части поверхности нагружения для трех серий повторного нагружения после предварительного простого и сложного нагружения по траектории нагружения, первый участок которой представлял осевое растяжение, второй — ортогональное нагружение в плоскости главных напряжений. Выполнены повторные лучевые нагружения после трех типов разгрузки: полная разгрузка по прямой в нулевое напряженное состояние, возвратное движение по второму участку траектории нагружения в точку излома, возвратное движение по траектории предварительного нагружения в нулевое напряженное состояние. Показано, что форма поверхности нагружения определяется видом напряженного состояния в начальный момент повторного нагружения, направлением этого нагружения и историей разгрузки. Дан анализ формы поверхностей нагружения с позиций варианта теории пластичности анизотропно упрочняющейся среды [4, 5].

Так же как и в [1–3], представлены данные экспериментов на тонкостенных трубчатых образцах, которые позволили определить типы траекторий нагружения, приводящие к повышению прочностных и деформационных свойств.

1. Рассмотрим результаты экспериментального исследования упругопластического деформирования циркониевого сплава Э-110. Опыты выполнялись на установке СН-10, созданной в СКТБ Института проблем прочности АН Украины (г. Киев).

В качестве испытательных образцов использовались серийно изготовленные трубы одной поставки со следующими размерами: внешний диаметр $D = 13,58 \pm 0,05$ мм, внутренний диаметр $d = 11,70 \pm 0,05$ мм, длина рабочей части $L = 170 \pm 1,0$ мм. В процессе испытаний регистрировались следующие параметры: осевая сила, внутреннее давление, осевое перемещение на заданной базе, внешний диаметр.

Стабильность нагружения обеспечивалась непрерывным контролем режима испытательной машины. Траектории нагружения задавались в

пространстве главных напряжений и имели вид одно- и многозвенных ломаных. Скорость нагружения принята $\dot{\sigma} = 0,1$ МПа/с с целью исключить временные эффекты при неупругом деформировании, которые в случае малых скоростей нагружения ($\dot{\sigma} \leq 0,1$ МПа/с) практически не зафиксированы [6].

Рассмотрим напряженное состояние элемента материала с неподвижными главными направлениями тензора напряжений: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Главные касательные напряжения $2T = \sigma_1 - \sigma_3$, $2T_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$, $2T_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$ ($T = T_{12} + T_{23}$) связаны параметром Лоде μ_σ :

$$T\mu_\sigma = T_{23} - T_{12}.$$

Для приращений этих касательных напряжений $2\Delta T = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$, $2\Delta T_{12} = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$, $2\Delta T_{23} = \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3$ введен параметр вида догружения $\mu_{\Delta\sigma}$ [4]:

$$\Delta T\mu_{\Delta\sigma} = \Delta T_{23} - \Delta T_{12}.$$

Результаты экспериментальных исследований анализируются с позиций теории пластичности анизотропно упрочняющейся среды [4, 5], согласно которой пластическая деформация представляется как последовательность пластических скольжений (сдвигов) в плоскостях действия главных касательных напряжений T , T_{12} , T_{23} , называемых площадками скольжений T , T_{12} , T_{23} (T — площадки главного сдвига, если касательные напряжения связаны неравенствами $T \geq T_{12} \geq T_{23}$ или $T \geq T_{23} \geq T_{12}$).

2. Опытные данные, изложенные ниже, разделены на две группы. К первой группе отнесены результаты исследования закономерностей упругопластического деформирования сплава при пропорциональных нагружениях и сложных нагружениях при постоянном значении максимального касательного напряжения ($T = \text{const}$). На этом участке по площадкам скольжения T и T_{23} происходят активные нагружения, по площадкам T_{12} — частичная разгрузка с прекращением роста пластических сдвигов, в направлении разгрузки наступает частичное упрочнение [5]. На участке $T = \text{const}$ проведено прямое и возвратное нагружение, а в конце участка сложного нагружения значение второго главного напряжения σ_2 существенно превышало значение первого главного напряжения σ_1 . Изучено влияние участков прямого и возвратного нагружения на последующий характер упрочнения сплава при сложном нагружении, в случае которого реализуется состояние чистого кручения с наложенным гидростатическим давлением, а приращения касательных напряжений $\Delta T_{23} = 2\Delta T = -2\Delta T_{12} \geq 0$, $\mu_{\Delta\sigma} = 3$.

Степень исходной анизотропии выяснялась путем испытаний образцов при пропорциональных нагружениях. Данные опытов необходимы для определения начальных прочностных и деформационных характеристик.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют результаты испытаний в виде диаграмм деформирования зависимости осевого напряжения σ_z от осевой деформации ε_z ($\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$), окружного напряжения σ_φ от окружной деформации ε_φ ($\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$) (у линий указаны номер образца и отношение главных напряжений $k = \sigma_z/\sigma_\varphi$). Траектории нагружения приведены на рис. 3 на безразмерной плоскости переменных $\sigma_z/\sigma_{0.2}^* - \sigma_\varphi/\sigma_{0.2}^*$ ($\sigma_{0.2}^*$ — предел текучести сплава при осевом растяжении, отвечающий допуску на остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_z^p = 0,2\%$).

В таблице представлены основные механические характеристики сплава, полученные при испытании образцов: номер образца, отношение главных напряжений k , параметр Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

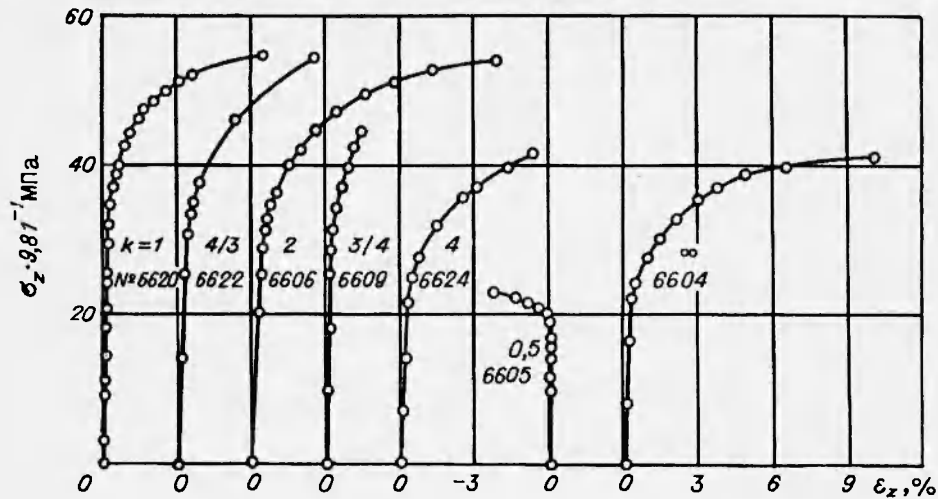


Рис. 1

($\sigma_z = \sigma_r$ — радиальное напряжение, равное нулю, напряжения σ_1, σ_2 принимают значения σ_z или σ_φ в зависимости от отношения напряжений k), пределы текучести $\sigma_{0,2}^s, \sigma_{0,5}^s, \sigma_{1,0}^s$, отвечающие значениям пластической деформации в первом главном направлении $\varepsilon_1^p = 0,2; 0,5; 1,0$ %, упругие постоянные $\alpha_z = \Delta\sigma_z/\Delta\varepsilon_z, \alpha_\varphi = \Delta\sigma_\varphi/\Delta\varepsilon_\varphi$ ($\Delta\varepsilon_z, \Delta\varepsilon_\varphi$) — приращения упругих деформаций в осевом и окружном направлении соответственно).

Номер образца	$k = \sigma_z/\sigma_\varphi$	μ_σ	$\sigma_1 \cdot 9,81^{-1}$ МПа			$\alpha_z \cdot 10^{-2}$ МПа	$\alpha_\varphi \cdot 10^{-2}$ МПа
			$\sigma_{0,2}^s$	$\sigma_{0,5}^s$	$\sigma_{1,0}^s$		
6601	∞	-1,0	23,8	26,5	29,0	66,50	
6624	4	-0,5	24,8	28,0	30,5	70,13	-33,50
6606	2	0	32,3	36,0	39,5	65,68	-14,00
6622	4/3	0,5	34,6	38,2	41,0	83,85	-20,50
6620	1	1	36,0	40,8	45,5	132,00	+210,00
	1	1,0	47,5	53,5	55,5		
6609	3/4	0,5	46,2	49,5	51,2	105,00	167,00
6605	0,5	0	41,8	44,5	45,8	352,00	147,00

Данные опытов, приведенные на рис. 1, 2 и в таблице, указывают на исходную анизотропию сплава, являющуюся следствием технологии изготовления оболочек тепловыделяющих элементов и технологических каналов [7, 8]. Диаграммы деформирования сплава в главных первом и втором направлениях, соответствующие одному и тому же значению параметра Лодэ μ_σ , но различным отношениям напряжений k , не совпадают между собой. Упругие постоянные α_z, α_φ также различны. В направлении прокатки (осевом направлении) эти значения меньше, чем в поперечном направлении. Пределы текучести зависят от отношения напряжений k .

Следует отметить данные опытов, полученные при равном двухосном растяжении $\sigma_z = \sigma_\varphi$. Наступление текучести в осевом направлении произошло раньше, чем в окружном. Поэтому в таблице для этого случая приведены два предела текучести, отвечающие заданной пластической деформации ε_1^p , в виде дроби, числитель которой — предел текучести в осевом направлении, знаменатель — в окружном.

На рис. 3 в плоскости переменных $\sigma_z/\sigma_{0,2}^s - \sigma_\varphi/\sigma_{0,2}^s$ представлены начальные кривые текучести сплава, построенные по указанным выше до-

пускам на остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_1^p = \text{const}$. Приведены семь траекторий нагружения, на каждой отмечены точки, соответствующие различным значениям ε_1^p . На траектории нагружения $\sigma_z = \sigma_\varphi$ точки 1, 2 отвечают $\varepsilon_z^p = \text{const}$, $\varepsilon_\varphi^p = \text{const}$. Кривые постоянных значений ε_1^p проведены через точки 1.

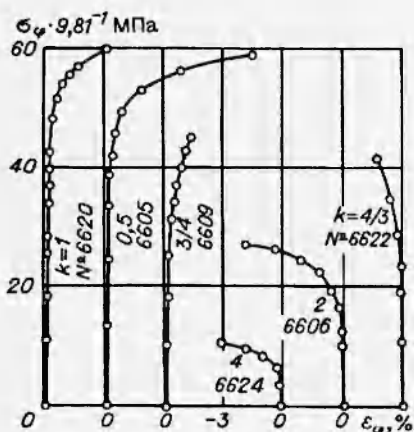


Рис. 2

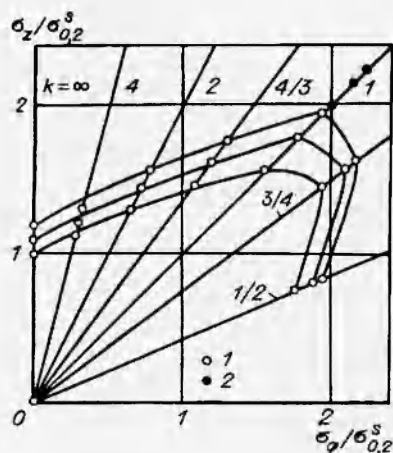


Рис. 3

Кривые постоянных значений ε_1^p , изображенные на рис. 3, не являются мгновенными кривыми текучести. Под кривой текучести понимается линия, отделяющая упругую область от пластической. Кривые $\varepsilon_1^p = \text{const}$ могут быть использованы в качестве практических показателей пластического поведения сплава в первом главном направлении при пропорциональном двухосном растяжении.

Заметим, что экспериментальные данные об упругопластическом деформировании сплава при простых и сложных нагружениях в литературе практически отсутствуют [9, 10].

Рассмотрим результаты опытов при сложном нагружении ($T = \text{const}$). Траекторию нагружения удобно представить на девиаторной плоскости переменных А. А. Ильюшина:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma_1 - \frac{1}{2} \sigma_2 \right), \quad S_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_2,$$

$$|S| = S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_1.$$

Здесь S — вектор напряжений; σ_1 — интенсивность напряжений. На рис. 4 приведена траектория нагружения $OABAC$, первый участок OA которой есть осевое растяжение $\sigma_z > 0$, $\sigma_\varphi = 0$ до $\sigma_z = 1,17\sigma_{0,2}^s$ ($\sigma_{0,2}^s$ — предел текучести сплава при осевом растяжении: $\sigma_{0,2}^s = 235$ МПа).

Сохраним обозначения главных напряжений и деформаций в соответствии с их направлениями в конце первого участка OA , тогда $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_\varphi$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_z$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_\varphi$.

В точке A траектории нагружения на рис. 4 происходит резкий излом траектории нагружения на угол 120° с выходом на участок AB , на котором нагружение производится при постоянном значении осевого напряжения $\sigma_z = \sigma_z(A)$ ($\sigma_z(A)$ — осевое напряжение в точке A) и $\sigma_\varphi > 0$ до значения окружного напряжения $\sigma_\varphi(B)$ в точке B ($\sigma_\varphi(B) = 491$ МПа). В точке B в конце участка сложного нагружения $k = 0,583$, $\mu_\sigma = 2,429$. На участке BA осуществлено возвратное нагружение. В точке A происходит

снова резкий излом траектории на 90° с выходом на участок AC сложного нагружения, на котором приращения напряжений связаны соотношением $\Delta\sigma_\varphi = 2\Delta\sigma_z$, $\Delta T_{23} = 2\Delta T = -2\Delta T_{12} > 0$, $\mu_{\Delta\sigma} = 3$. Точка C отвечает моменту, предшествующему разрушению образца.

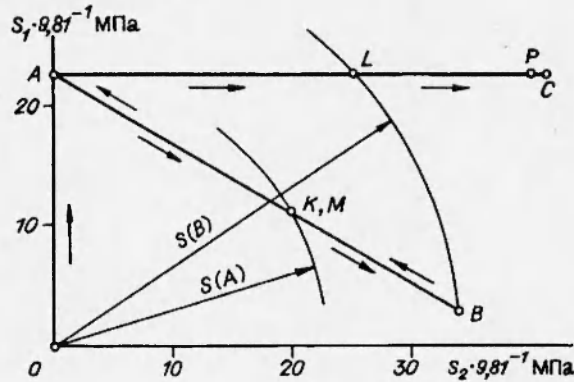


Рис. 4

На рис. 5 представлены диаграммы деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$, $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ (точки 1) для траектории нагружения, показанной на рис. 4. Данные опыта свидетельствуют о следующем. На участке OA траектории нагружения осевым растяжением элемент материала выведен в пластическое состояние — состояние полной пластичности. Пластическая деформация является результатом сдвигов на площадках скольжения T и T_{12} , $T = T_{12}$.

Догружение из точки A на участке AB траектории нагружения вызывает упругое деформирование элемента в окружном направлении (это видно из графика $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ на рис. 5). Наклон кривой на участке AK совпадает с упругим наклоном кривой $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ чистого сдвига, полученной по данным опыта при двухосном растяжении $\sigma_z = 0,5\sigma_\varphi$, $\mu_\sigma = 0$ (см. рис. 2). В окрестности точки K наблюдается заметное отклонение кривой от упругой.

Выясним характер упругопластического деформирования элемента в осевом направлении при догружениях на участке AB траектории. Для этого на участке ABA кривой $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ нанесены точки зависимости окружного напряжения от осевой деформации $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\Delta\varepsilon_z)$ (точки 2). Видно, что на участке AK четко прослеживается линейная зависимость, в точке K наблюдается отклонение от этой зависимости, что означает смену упругого деформирования пластическим.

Таким образом, догружение из точки K траектории нагружения на рис. 4 вызывает одновременное появление пластического деформирования в осевом и в окружном направлении, а точка K является границей упругого состояния и состояния полной пластичности. Пластические сдвиги происходят одновременно по площадкам скольжения T и T_{23} . Заметим, как видно из рис. 4, что в точке K модуль вектора напряжений $|\mathbf{S}| = S$ с точностью до разброса экспериментальных данных равен величине вектора напряжений в точке A $S(A)$. С достаточным основанием можно считать границей упругого состояния и состояния полной пластичности на девиаторной плоскости А. А. Ильюшина (S_1, S_2) точку пересечения дуги окружности радиусом $S(A)$ и прямой AB на рис. 4.

Нагружения $\sigma_\varphi > 0$, $\sigma_z = \sigma_z(A)$ на участке AB траектории нагружения последовательно вызывают следующие деформационные состояния: — упругое до тех пор, пока интенсивность напряжений σ_i меньше интенсивности напряжений σ , в конце участка простого нагружения;

— полной пластичности (при превышении напряжением σ , величины σ ; в конце участка простого нагружения). Происходит переключение площадок скольжения, площадки скольжения T_{23} становятся площадками главного сдвига, площадки скольжения T — вторыми, касательные напряжения связаны неравенствами $T_{23} \geq T > T_{12}$. Касательное напряжение T_{12} меняет свой знак, и происходит переход от частичной разгрузки к активному нагружению.

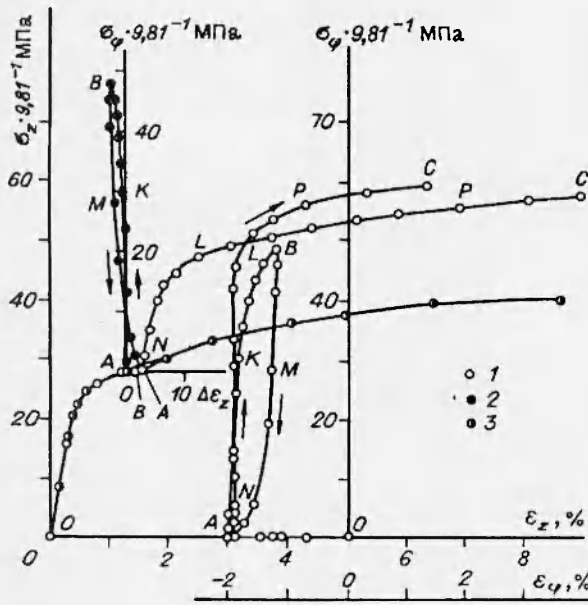


Рис. 5

ское деформирование и переход к деформированному состоянию полной пластичности с площадками скольжения T и T_{12} .

Догружение из точки A траектории нагружения на участке AC , как видно из диаграмм деформирования на участках AC рис. 5, вызвало упругое деформирование в осевом и окружном направлении до точки N . При последующих догружениях наблюдается заметное отклонение диаграммы $\sigma_z = \sigma_z(\epsilon_z)$ от упругой, а в окружном направлении деформирование упругое. Пластическое деформирование в состоянии, аналогичном неполной пластичности, наблюдается на участке AL траектории нагружения. В точке L траектории значение вектора напряжений S равно величине вектора напряжений в точке B в момент применения возвратного догружения $S = S(B)$. В точке L наблюдается заметное появление пластического деформирования в окружном направлении. Элемент материала переходит в деформированное состояние — состояние полной пластичности. Площадки скольжения — это T и T_{23} (T — площадки главного сдвига).

Таким образом, нагружение на участке AC траектории нагружения последовательно вызывает деформированные состояния:

- упругое,
- неполной пластичности, пока интенсивность напряжений меньше интенсивности напряжений в конце участка AB сложного нагружения,
- полной пластичности (при превышении σ , своего значения в точке B).

В точке P происходит переключение площадок скольжения T и T_{23} , площадки T_{23} становятся площадками главного сдвига. На площадках скольжения T_{12} происходит переход от частичной разгрузки к активному нагружению.

На участке BA траектории нагружения происходит полная разгрузка, пока напряжение $\sigma_\phi \geq \sigma_z$, а площадки скольжения T_{23} являются площадками главного сдвига. В точках M траектории и диаграмм деформирования напряжения $\sigma_\phi = \sigma_z = \sigma_z(A)$. Догружение из точки M вызвало заметное появление пластических деформаций в осевом направлении. Площадки скольжения T снова становятся площадками главного сдвига. В окружном направлении деформирование упругое. В окрестности точки A наблюдаются заметное пластиче-

На кривую $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ нанесены точки кривой $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ осевого растяжения (точки 3). На участке AC точки кривой $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ расположились значительно выше точек кривой осевого растяжения. Данные опыта на участке AC траектории нагружения свидетельствуют о резком увеличении пределов текучести и прочности. Предел текучести в осевом направлении, определенный по допуску $\varepsilon_1^p = 0,2\%$, превышает начальное значение $\sigma_{\bar{z},2}$ в 1,79 раза, что выше предела прочности в 1,1 раза. Предельные значения: напряжение σ_z превышает предел прочности при осевом растяжении в 1,43 раза, напряжение σ_φ выше предела прочности при осевом растяжении в 1,48 раза, деформация ε_z в момент, предшествующий разрушению образца, выше аналогичной при осевом растяжении.

Увеличение прочностных свойств и сохранение или увеличение деформационных свойств в одном из главных направлений тензора напряжений являются результатом прямого и возвратного нагружения на одном из участков сложного нагружения, сопровождаемого частичной разгрузкой в одном из направлений предварительного пластического деформирования и прекращением роста пластических сдвигов в направлении разгрузки, активными нагружениями и ростом пластических сдвигов в других направлениях и превышением второго главного напряжения над первым.

Результатом экспериментального исследования упругопластического деформирования начально-анизотропного сплава при простом и последующих сложных нагружениях, сопровождающихся частичной разгрузкой и прекращением роста пластических сдвигов в направлении разгрузки, является нахождение границы деформированных состояний неполной и полной пластичности. Независимо от предыстории нагружения и направления последующего сложного нагружения граница состояний определяется значением интенсивности напряжений в точке излома траектории нагружения в конце предшествующего участка траектории нагружения.

Эти эффекты могут быть использованы в качестве технологического приема управления анизотропией металла трубчатых элементов конструкций и создания в них заданных прочностных и деформационных свойств.

3. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований трансформации фронтальной части поверхности нагружения для трех серий повторных простых и сложных нагружений после предварительного сложного нагружения по траектории OAB (см. рис. 4) и различных историй разгрузки, целью которых было одновременное изучение влияния предварительного сложного нагружения и истории разгрузки на характер деформационного упрочнения сплава при повторных нагружениях. Следует учитывать историю разгрузки, поскольку кроме традиционно рассматриваемой полной разгрузки, когда на площадках скольжения T , T_{12} , T_{23} приращения касательных напряжений отрицательны, т. е. $\Delta T < 0$, $\Delta T_{12} < 0$, $\Delta T_{23} < 0$, существует частичная разгрузка. В этом случае при догружениях в одних направлениях происходит разгрузка, а в других — активные нагружения, которые могут вызвать неупругое деформирование или изменение механического состояния.

Выполнены следующие программы нагружений:

1) нагружение по траектории OAB (рис. 6), разгрузка по лучу BO простого нагружения, повторное простое нагружение $\sigma_z = k\sigma_\varphi$;

2) нагружение по траектории OAB , возвратное нагружение на участке BA сложного нагружения до точки A (рис. 7), повторное сложное нагружение AC из точки A по одному из лучей, на котором сохранялось постоянным значение параметра вида догружения $\mu_{\Delta\sigma}$;

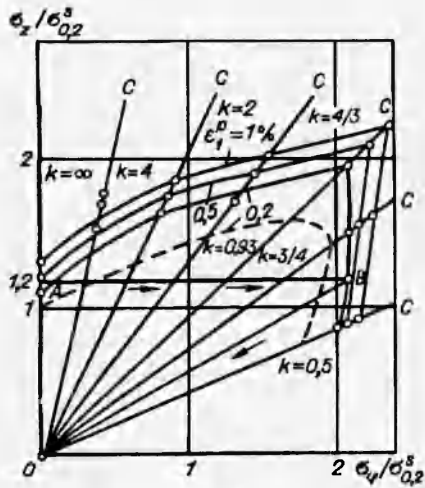


Рис. 6

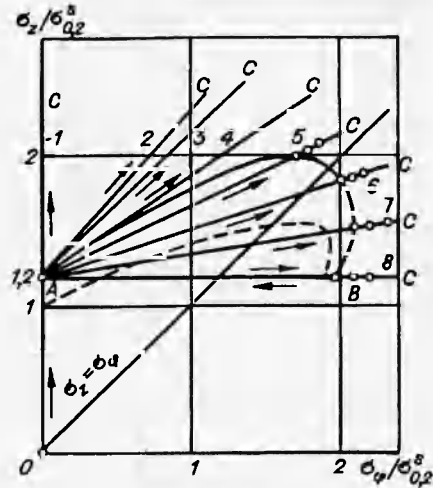


Рис. 7

3) нагружение по траектории OAB , возвратное нагружение по траектории предварительного нагружения BAO в нулевое напряженное состояние, повторное простое нагружение OC $\sigma_z = k\sigma_\varphi$. Траектории нагружения приведены на рис. 8.

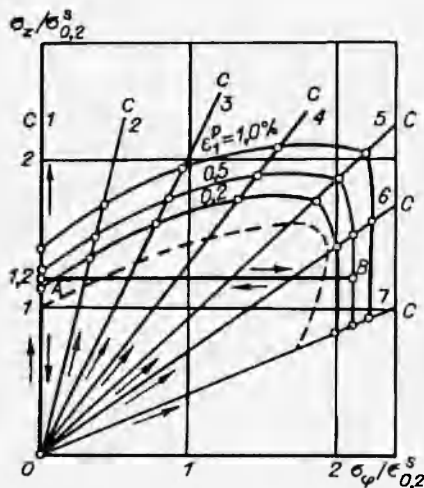


Рис. 8

При определении предела текучести в условиях повторного нагружения учитывалось изменение упругих свойств в результате пластической деформации на участке OAB траектории нагружения. Модуль Юнга уменьшился на $5 \div 7 \%$, изменения коэффициента Пуассона не отмечено. Границу перехода из упругого состояния в пластическое определяли по различным допускам на остаточную пластическую деформацию в первом главном направлении $\varepsilon_1^p = \text{const}$.

Нагружение по программе 1. На рис. 6 показаны траектории предварительного сложного нагружения OAB , полной разгрузки BO , повторного простого нагружения. Повторные нагружения осуществляли при разных значениях k и параметра Лодэ μ_σ : $k = \infty$ ($\mu_\sigma = -1$), $k = 4$ ($\mu_\sigma = -0,5$), $k = 2$ ($\mu_\sigma = 0$), $k = 4/3$ ($\mu_\sigma = 0,5$), $k = 0,93$ ($\mu_\sigma = 1,15$), $k = 3/4$ ($\mu_\sigma = 1,67$), $k = 0,5$ ($\mu_\sigma = 3,0$).

На рис. 9, 10 указаны номера образцов и приведены кривые деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ и $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ на участках предварительного нагружения $OABO$ (точки 2) и повторного простого нагружения на участках OC (точки 1). Условный предел текучести находили для лучевых траекторий нагружения по диаграммам деформирования $\sigma_1 = \sigma_1(\varepsilon_1)$ как напряжение, отвечающее допускам $\varepsilon_1^p = 0,2; 0,5; 1,0 \%$. На рис. 6 в плоскости переменных $\sigma_z/\sigma_{0,2}^s - \sigma_\varphi/\sigma_{0,2}^s$ на участках OC при повторных простых нагружениях точками отмечены указанные выше значения ε_1^p . Через точки $\varepsilon_1^p = \text{const}$ проведены кривые поверхностей нагружения. Для сравнения пунктиром нанесена начальная кривая текучести.

На рис. 9, 10 указаны номера образцов и приведены кривые деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ и $\sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ на участках предварительного нагружения $OABO$ (точки 2) и повторного простого нагружения на участках OC (точки 1). Условный предел текучести находили для лучевых траекторий нагружения по диаграммам деформирования $\sigma_1 = \sigma_1(\varepsilon_1)$ как напряжение, отвечающее допускам $\varepsilon_1^p = 0,2; 0,5; 1,0 \%$. На рис. 6 в плоскости переменных $\sigma_z/\sigma_{0,2}^s - \sigma_\varphi/\sigma_{0,2}^s$ на участках OC при повторных простых нагружениях точками отмечены указанные выше значения ε_1^p . Через точки $\varepsilon_1^p = \text{const}$ проведены кривые поверхностей нагружения. Для сравнения пунктиром нанесена начальная кривая текучести.

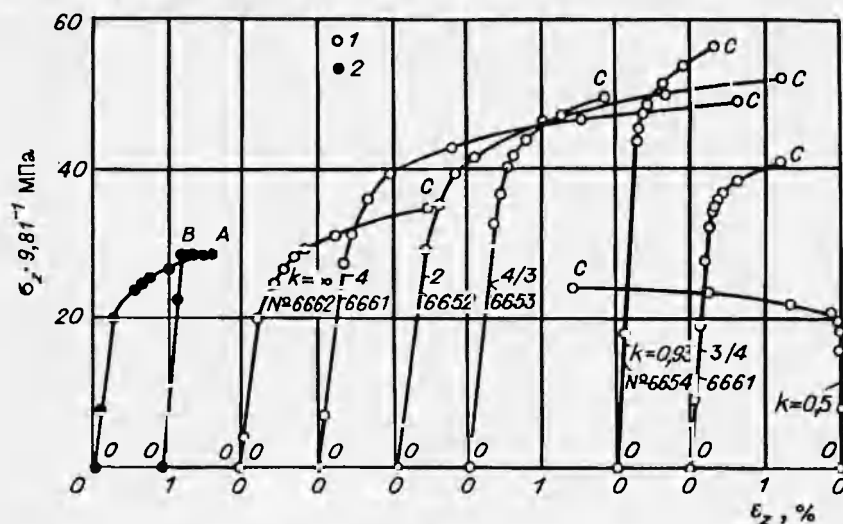


Рис. 9

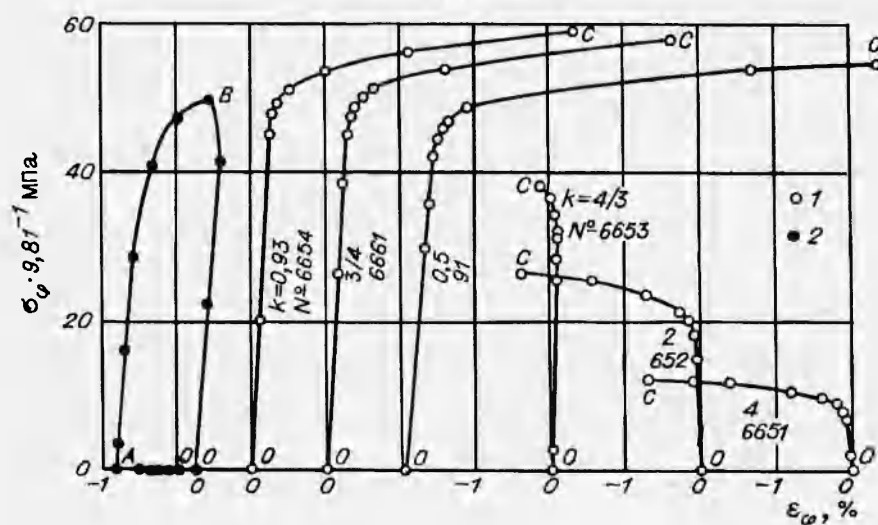


Рис. 10

Повторные простые нагружения образцов, подвергнутых предварительному нагружению по программе 1, определяют вид поверхности нагружения при данном варианте траектории предварительного нагружения. Полученные кривые, соответствующие различным допускам ϵ_z^r , свидетельствуют об анизотропии процесса упрочнения с наибольшим упрочнением в направлении предварительного сложного нагружения. В области изменения напряжений $\sigma_z > \sigma_\varphi$, $\infty < k < 0,93$, как видно из рис. 6, кривые, отвечающие различным значениям ϵ_z^r , подобны. В области изменения напряжений $\sigma_z < \sigma_\varphi$, вид кривой $\epsilon_z^r = 0,2\%$ определяется условием Треска. При повторных простых нагружениях $\sigma_z = 0,93\sigma_\varphi$, $\sigma_z = 0,75\sigma_\varphi$ текучесть наступает при достижении напряжения $\sigma_\varphi(B)$ в точке *B*. В этой же области кривые $\epsilon_z^r = 0,5; 1,0\%$ подобны.

Нагружение по программе 2. Траектории нагружения изображены на рис. 7. После предварительного нагружения по траектории *OAB* осуществлено возвратное движение $\sigma_z = \sigma(A)$ в состояние осевого растяжения в точке *A*. Последующие повторные нагружения — сложные нагружения по прямым *AC* с сохранением постоянного значения параметра вида догру-

жения $\mu_{\Delta\sigma} = -1,0$ — линия 1 (продолжение процесса простого нагружения $\Delta\sigma_z > 0, \Delta\sigma_\varphi = 0$), $\mu_{\Delta\sigma} = 0,82; 1,00; 2,00; 3,00; 5,50; 11,00$ — линии 2–7 (нагружение $\Delta\sigma_\varphi > 0, \Delta\sigma_z > 0$), $\mu_{\Delta\sigma} = \infty$ — линия 8 (нагружение $\Delta\sigma_\varphi > 0, \Delta\sigma_z = 0$).

Диаграммы деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z), \sigma_\varphi = \sigma_\varphi(\varepsilon_\varphi)$ представлены на рис. 11, 12, где 1 — точки кривых на участке АВА предварительной траектории нагружения, 2 — точки кривых при повторном сложном нагружении на участках АС траектории нагружения. Данные опытов на участках сложного нагружения свидетельствуют о следующем.

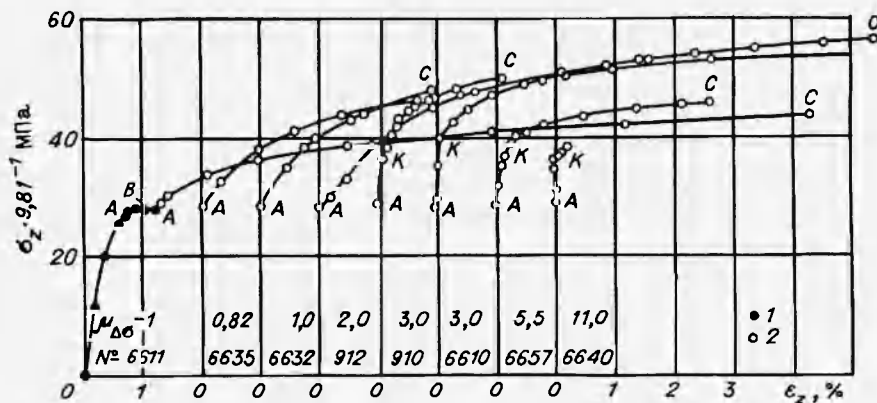


Рис. 11

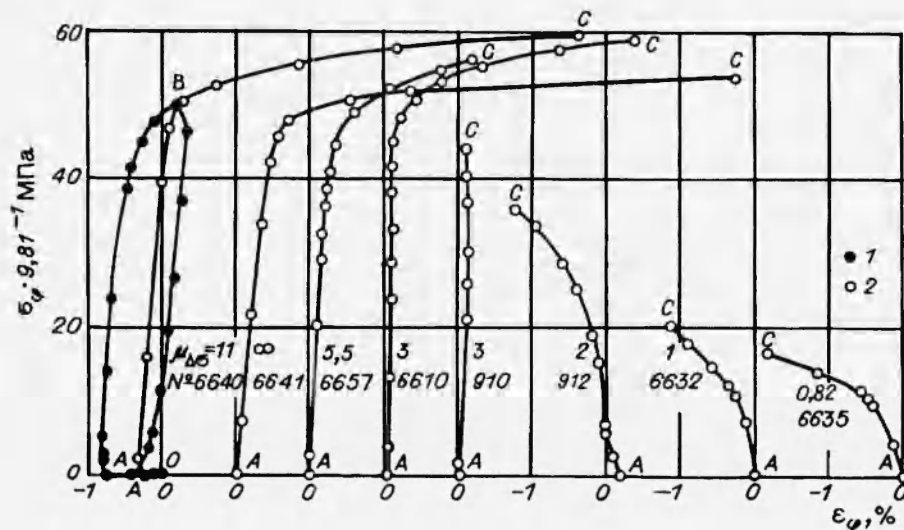


Рис. 12

Догрузения из точки А на участках АС траекторий нагружения при $\mu_{\Delta\sigma} = -1,00; 0,82; 1,00; 2,00$ вызвали дальнейшее пластическое деформирование в первом (осевом) и втором (окружном) направлении. Положительному приращению окружного напряжения σ_φ , как видно из рис. 12, соответствует отрицательное приращение окружной деформации ε_φ . Это означает, что независимо от направления догрузки, характеризуемого параметром вида догрузки $\mu_{\Delta\sigma}$ и приращением максимального касательного напряжения $2\Delta T = \Delta\sigma_z > 0$, как при активных нагружениях на площадках скольжения T, T_{12}, T_{23} ($|\mu_{\Delta\sigma}| \leq 1$), так и при догрузениях $1 \leq \mu_{\Delta\sigma} \leq 2$, сопровождаемых частичной разгрузкой в направлении предварительного пластического деформирования T_{12} ($\Delta T_{12} < 0$) и активными

нагрузениями на площадках скольжения T и T_{23} ($\Delta T > 0$, $\Delta T_{23} > 0$), пластическое деформирование продолжается на тех же площадках скольжения T и T_{12} , как и при нагрузениях на первом участке AO траектории нагружения. В направлении T_{12} нет частичного упрочнения и перехода к деформированному состоянию неполной пластичности.

Результаты опыта при нагрузениях на участке AC с $\mu_{\Delta\sigma} = 3,00$ приведены на рис. 5, и выше дан подробный анализ закономерности упруго-пластического деформирования сплава.

Те же закономерности упругопластического деформирования наблюдаются при нагрузениях на участках AC с $\mu_{\Delta\sigma} = 5,5; 11,0$. При таких догружениях площадки скольжения T_{23} становятся площадками главного сдвига. Данные опытов на рис. 12 указывают на заметное пластическое деформирование в окружном направлении, которое наблюдается при достижении напряжением σ_{φ} напряжения $\sigma_{\varphi}(B)$ в точке B . Как видно из рис. 12, наряду с ростом прочностных свойств наблюдается заметное увеличение предельной деформации в окружном направлении.

По данным опытов этой программы построены точки поверхности нагружения в плоскости безразмерных переменных $\sigma_z/\sigma_{0,2}^s - \sigma_{\varphi}/\sigma_{0,2}^s$ по допускам на остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_1^n = 0,2; 0,5; 1,0$ % при повторных нагружениях (рис. 7). Для сравнения на рисунке пунктиром нанесена начальная кривая текучести. Через точки $\varepsilon_1^p = 0,2$ % проведена сплошная кривая. Поверхность нагружения сместилась в направлении луча $\sigma_z = \sigma_{\varphi}$. В окрестности луча предел текучести в осевом направлении значительно выше предела текучести при осевом растяжении, он также превосходит предел прочности при осевом растяжении в среднем на 20 %. Пределы текучести в окружном направлении при догружениях $\mu_{\Delta\sigma} \geq 3$ близки к значению окружного напряжения $\sigma_{\varphi}(B)$ в точке B . Наибольшее упрочнение наблюдается при догружениях с $\mu_{\Delta\sigma} = 11,0$. В этом случае повторное пластическое деформирование наступает при достижении напряжения $\sigma_{\varphi}(B)$.

Нагружение по программе 3. На рис. 8 показаны траектория предварительного нагружения OAB , разгрузки BOA и повторные нагружения — простые нагружения, осуществленные при следующих значениях k и μ_{σ} : $k = \infty$ ($\mu_{\sigma} = -1$), $k = 4$ ($\mu_{\sigma} = -0,5$), $k = 2$ ($\mu_{\sigma} = 0$), $k = 4/3$ ($\mu_{\sigma} = 0,5$), $k = 0$ ($\mu_{\sigma} = 1,08$), $k = 3/4$ ($\mu_{\sigma} = 1,67$), $k = 0,5$ ($\mu_{\sigma} = 3,0$). Диаграммы деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$, $\sigma_{\varphi} = \sigma_{\varphi}(\varepsilon_{\varphi})$ при повторных нагружениях изображены на рис. 13, 14. Диаграммы деформирования на участках $OABAO$ предварительного нагружения аналогичны диаграммам на рис. 5 (участок $OABA$) и на рис. 9, 10 (участок BO).

По данным опытов на рис. 13, 14 на безразмерной плоскости переменных $\sigma_z/\sigma_{0,2}^s - \sigma_{\varphi}/\sigma_{0,2}^s$ (рис. 8) построены фронтальные части поверхностей нагружения по допускам на остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_1^p = 0,2; 0,5; 1,0$ % при повторных нагружениях. Как видно из расположения кривых, в области изменения напряжений $\sigma_z > \sigma_{\varphi} > 0$ кривые подобны. Четко просматривается зависимость предела текучести от вида напряженного состояния. В области изменения напряжений $\sigma_{\varphi} > \sigma_z$ в качестве условия текучести при повторных нагружениях, определяемого по допуску $\varepsilon_1^p = \varepsilon_{\varphi}^p = 0,2$ %, может быть принято напряжение $\sigma_{\varphi}(B)$ в точке B в момент приложения возвратного движения.

Пунктиром на рис. 8 приведена фронтальная часть начальной поверхности текучести. В области $\sigma_{\varphi} < \sigma_z$ кривые постоянных значений $\varepsilon_1^p = \varepsilon_z^p = \text{const}$ подобны начальной кривой. В области изменения напряжений $\sigma_{\varphi} > \sigma_z$ кривые $\varepsilon_1^p = \varepsilon_{\varphi}^p = \text{const}$ вполне удовлетворительно согласуются с критерием Треска.

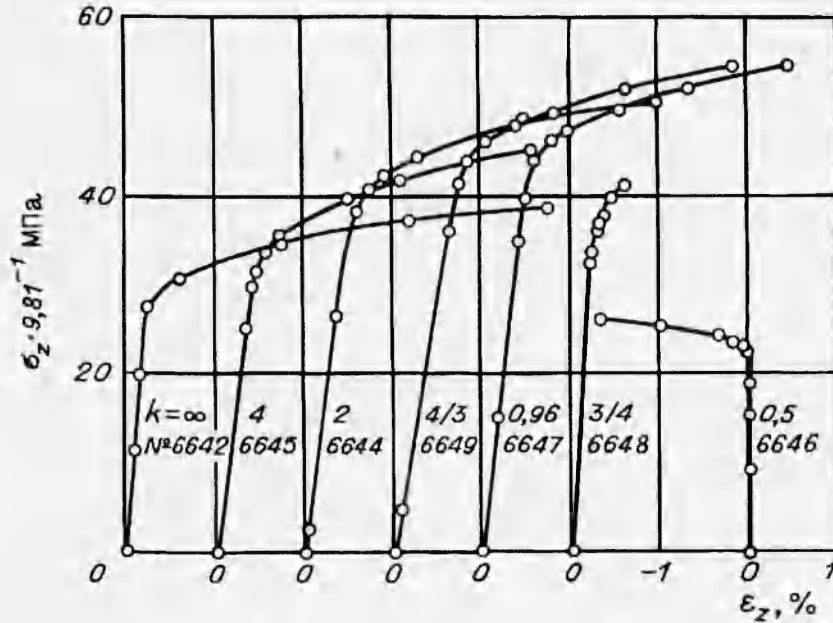


Рис. 13

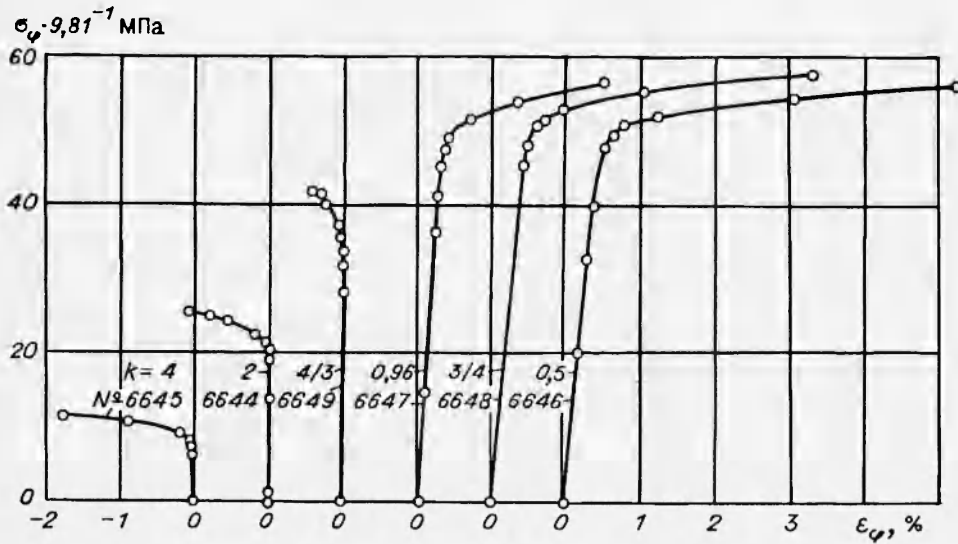


Рис. 14

Данные опытов этой программы свидетельствуют о следующем. Прямое нагружение OAB , возвратное нагружение BAO и повторное простое нагружение OC приводят к изменению поверхности нагружения и приближению ее к форме, свойственной изотропному упрочнению в области изменения напряжений $\sigma_z \geq \sigma_\varphi \geq 0$. В области изменения напряжений $\sigma_\varphi > \sigma_z$ вид поверхности не зависит от направления нагружения, а определяется только достигнутым напряженным состоянием (состояние полной пластичности, площадки скольжения T и T_{23} , T_{23} — площадки главного сдвига) в точке B в момент приложения возвратного нагружения. В области изменения напряжений $\sigma_\varphi > \sigma_z$ при повторных простых нагружениях пластические сдвиги появляются и развиваются на тех же площадках скольжения T и T_{23} , а T_{23} — площадки главного сдвига.

Сравним данные опытов, полученные при нагружениях по програм-

мам 1–3. Рис. 15 иллюстрирует поверхности нагружения, построенные по допуску $\varepsilon_1^p = 0,2\%$ (линии 1–3 соответствуют программам нагружения 1–3). Поверхность нагружения (линия 1), построенная после предварительного сложного нагружения OAB , полной разгрузки BO , повторного простого нагружения OC располагается значительно ниже поверхностей, полученных по данным опытов программ 2 и 3, в области изменения напряжений $\sigma_z \geq \sigma_\varphi \geq 0$. Четко просматривается влияние истории разгрузки и последующего простого или сложного нагружения на расположение кривых. В области изменения напряжений $\sigma_z < \sigma_\varphi$ отклонение кривых незначительно. Поверхности нагружения имеют вид, свойственный критерию текучести Треска. Наступление пластического деформирования при повторных простых или сложных нагружениях определяется достигнутым напряженным состоянием в точке B траектории предварительного нагружения OAB и не зависит от истории нагружения. На рис. 15 пунктиром нанесена начальная кривая текучести. Повторные поверхности располагаются выше начальной кривой текучести.

В заключение отметим следующее.

1. Установлено, что форма и размеры поверхности нагружения определяются предварительной пластической деформацией, являющейся результатом наложения деформированных состояний полной, неполной и полной пластичности со сменой площадок главного сдвига, направлением и протяженностью участков частичной разгрузки, повторным нагружением в условиях простого или сложного нагружения.

2. Анизотропные проявления неупругих свойств как результат простого и сложного нагружения, сопровождаемого частичной разгрузкой с частичным упрочнением в направлении разгрузки и активными нагружениями в других направлениях, позволяют наиболее полно использовать имеющиеся резервы прочности и пластичности.

Определен тип траекторий предварительного нагружения, приводящий к повышению предельных прочностных и деформационных свойств в одном из главных направлений тензора напряжений по сравнению с аналогичными свойствами при простом нагружении. Указаны классы повторных нагружений, при которых сохраняются предельные прочностные и деформационные свойства.

3. Деформационное упрочнение циркониевого сплава Э-110 при повторном нагружении существенно определяется всей историей предварительного нагружения, историей разгрузки и направлением повторного нагружения.

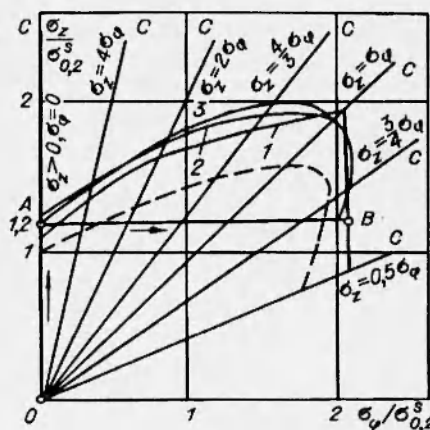


Рис. 15

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалкин В. М., Усова О. М. О резервах прочности при пластическом деформировании. Сообщение 1 // Пробл. прочности. 1991. № 11. С. 3–8.
2. Жигалкин В. М., Усова О. М. О резервах прочности при пластическом деформировании. Сообщение 2 // Там же. С. 9–13.
3. Шемякин Е. И., Жигалкин В. М., Линдин Г. Л. К вопросу о резервах прочности при пластическом деформировании // Прочность материалов и эле-

- ментов конструкций при сложном напряженном состоянии: Тр. Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1978. С. 75-79.
4. Шемякин Е. И. Анизотропия пластического состояния // Численные методы механики сплошной среды: Сб. науч. тр./ АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ; ВЦ. 1973. № 4. С. 150-162.
 5. Христианович С. А. Деформация упрочняющегося пластического тела // Изв. СССР. МТТ. 1974. № 2. С. 148-174.
 6. Степанов Л. П. Временные эффекты при пластическом деформировании: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1986.
 7. Никулина А. В., Решетников Н. Г., Шебалдов Л. Е. и др. Технология изготовления канальных труб из сплава Zr-2,5 % Nb, установленных на реакторах РБМК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 1990. Вып. 2(36). С. 46-54.
 8. Родченков Б. С., Ривкин Е. Ю., Виснин А. М. и др. Прочность труб технологических каналов // Там же. С. 14-21.
 9. Писаренко Г. С., Киселевский В. М. Прочность, пластичность материалов в радиационных потоках. Киев: Наук. думка, 1979.
 10. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1981.

*Поступила в редакцию 17/III 1994 г.,
в окончательном варианте — 11/X 1994 г.*
