

УДК 621.77.014

Медведев М. И.
Фролов Я. В.
Андреев В. В.
Бобух А. С.
Беспалова Н. А.

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ГОРЯЧЕМ ПРЕССОВАНИИ ТРУБ

Известно [1–3], что выбор рациональных температурно-скоростных параметров обработки металлов давлением с высокой точностью производится на основе испытаний на кручение. Этот метод, наряду с определением сопротивления деформации металла по значению крутящего момента, позволяет получить достаточно полное представление о пластичности металла применительно к таким условиям обработки, когда преобладает сдвиговая деформация, а именно при горячем прессовании труб. В качестве показателя пластичности широко используется степень деформации сдвига [4].

Несмотря на то, что деформация при кручении протекает не монотонно, степень деформации сдвига может быть рассчитана [5, 6]:

$$\Lambda_p = \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол наклона риски, предварительно нанесенной на образец в месте разрушения.

При равномерном распределении деформации по длине образца формула (1) представляется в виде:

$$\Lambda_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{l}, \quad (2)$$

где r – радиус образца, мм;

n – число оборотов до разрушения;

l – расчетная длина образца, мм.

С целью уточнения температурно-деформационных режимов прессования труб из титановых сплавов (BT1-0, ПТ-7М, BT-14, BT-15, BT-20, ТС-5 и ТС-6) в работе проведено исследование пластичности и сопротивления деформации при горячем кручении образцов.

Исследование на кручение проводили на испытательной машине СМЭГ-10Т (скручивающая машина с электронным силоизмерителем горизонтального типа, с максимальным крутящим моментом 10 кгс × м (100 Н × м), температурная). Максимальная температура образцов при испытаниях составляла 1250 °С. Активный захват испытательной машины имеет плавную регулировку оборотов от 5 до 200 об/мин. Применяя образцы с разным соотношением радиуса образца к длине рабочей части, получали диапазон изменения скоростей деформации от 0,25 до 20 с⁻¹. При этом скорость деформации определяли по следующей зависимости:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\pi \cdot r \cdot N}{30 \cdot l}, \quad (3)$$

где N – число оборотов активного захвата скручивающей машины, об/мин.

Запись угла поворота активного захвата, крутящего момента и осевого усилия проводили при помощи осциллографа типа Н-115 в комплекте с усилителем типа АН4-7 для записи на фотобумаге. Скорость движения фотобумаги составляла 250 мм/сек. На этой же

осциллограмме записывали угол закручивания образца путем регистрации импульсов от дополнительно установленного на активном захвате машины магнитно-индукционного датчика, который обеспечивал импульс через каждые 0,1 оборота. Нагрев образцов с выдержкой при температуре испытаний в течение 20 минут осуществляли в установленной на машине электрической печи сопротивления. Общий вид образцов, которые использовались при испытаниях, приведен на рис. 1.

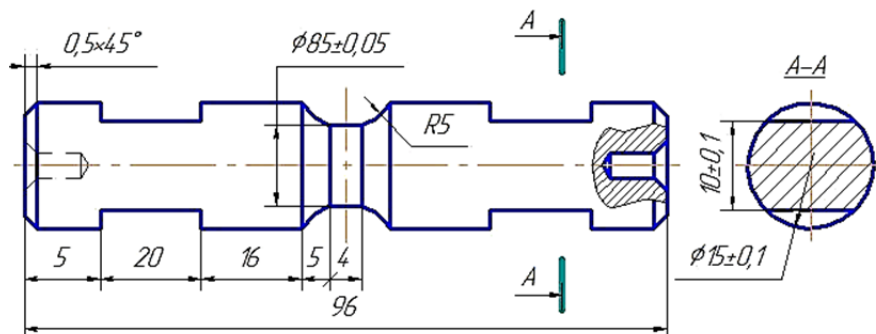


Рис. 1. Общий вид и геометрические размеры образцов для испытаний на кручение

Испытание образцов вышеуказанных сплавов на основе титана проводили по трем схемам нагружения при температурах 800–1250 °С:

а) без закрепления пассивного захвата. При этом он имел свободное перемещение в осевом направлении под воздействием изменения рабочей длины образца при скручивании, что исключает возникновение напряжений в образце;

б) с закреплением пассивного захвата в осевом направлении. При этом вследствие удлинения образца при скручивании в нем возникают напряжения сжатия ($\sigma_{сж} = 2...3$ МПа);

в) с приложением внешней осевой растягивающей нагрузки при незакрепленном пассивном захвате. При этом напряжение растяжения в образцах составляло $\sigma_{растяж} = 10$ МПа.

На рис. 2 приведены типовые диаграммы кручения, полученные при нагружении образцов по указанным трем схемам.

На кривых зависимости крутящего момента от угла закручивания образца наблюдаются три характерные участка изменения сопротивления деформации металла в данных условиях испытаний.

Первый (отрезок 0-1, рис. 2) характерен резким возрастанием сопротивления деформации при незначительной величине степени деформации (угла закручивания). На этом этапе происходит интенсивное деформационное упрочнение металла.

На втором участке (отрезок 1-2, рис. 2), который характеризуется плавным снижением сопротивления деформации почти по прямолинейному закону, происходит разупрочнение металла по механизму динамического возврата при существенном увеличении степени деформации за счет осуществления поперечного скольжения или переползания дислокаций [7].

На третьем участке (отрезок 2-3, рис. 2) происходит резкое снижение сопротивления деформации образца, которое заканчивается его разрушением. Следует отметить, что точка 2 перехода от второго участка изменения $M_{кр}$ к третьему весьма отчетлива в случае кручения без осевого напряжения и с приложением осевой растягивающей нагрузки (рис. 2, а, в), а при наличии осевых сжимающих напряжений точка перехода от второго участка к третьему выражена менее четко. Это позволяет считать, что третий участок на кривой деформирования (рис. 2) обусловлен развитием трещин в образце, которая по мере своего распространения уменьшает площадь поперечного сечения рабочей части образца, что соответственно снижает крутящий момент до нулевого значения.

В данной работе пластичность исследуемых сплавов на основе титана рассчитывали исходя из количества оборотов (угла закручивания) до момента начала разрушения, который определяли по величине крутящего момента, при котором происходило его резкое уменьшение (точка 2 на диаграмме изменения $M_{кр}$).

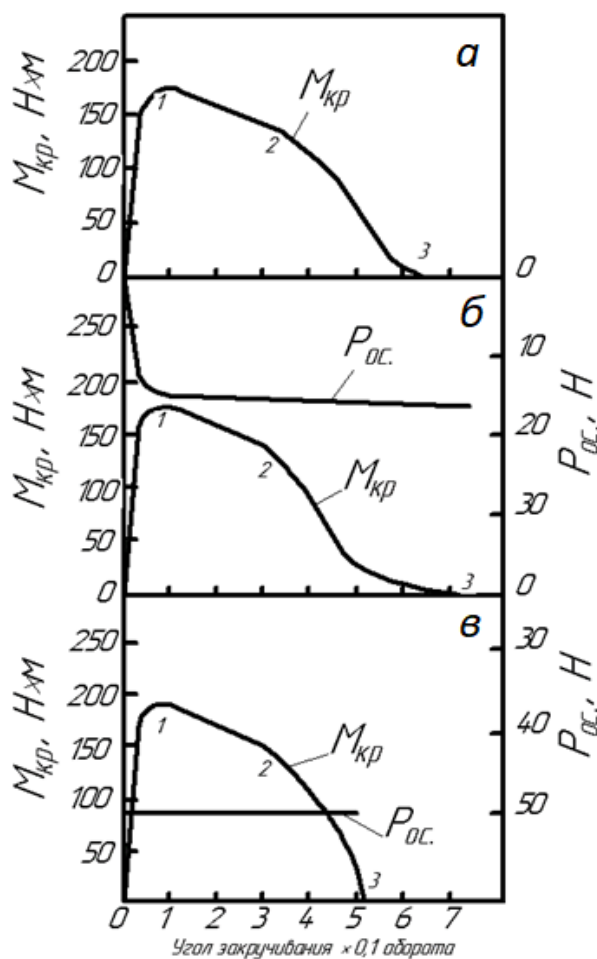


Рис. 2. Характерный вид диаграмм при испытаниях на кручение:
 а – без закрепления пассивного захвата; б – с закреплением пассивного захвата;
 в – с приложением осевой растягивающей нагрузки P

При этом истинный предел текучести определяли по значению касательных напряжений:

$$\sigma_{\text{и}} = \sqrt{3} \cdot \tau_{\text{к}}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{к}}$ – касательные напряжения наружной поверхности испытуемого образца [8].

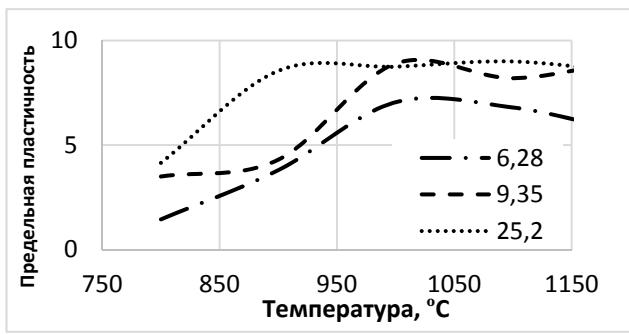
$$\tau_{\text{к}} = \frac{12 \cdot M_{\text{кр}}}{\pi \cdot D^3}, \quad (5)$$

где $M_{\text{кр}}$ – максимальное значение крутящего момента, $\text{Н} \times \text{м}$.

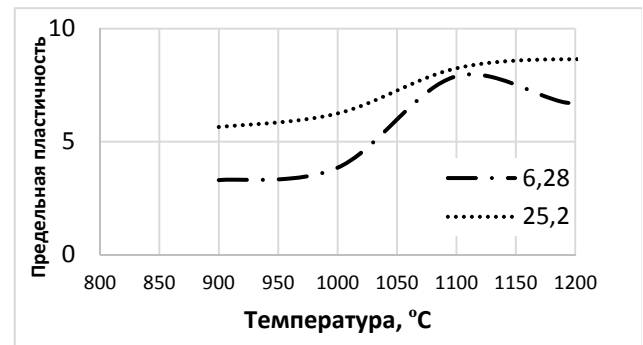
Результаты исследований кручения образцов из выбранных сплавов обобщим в виде графических зависимостей степени деформации сдвига от температуры испытаний, характерный вид которых приведен на рис. 3.

По указанным графическим зависимостям (рис. 3) возможно определить температурный интервал максимальной пластичности при обработке давлением исследуемых сплавов. Так, температурный интервал максимальной пластичности для сплава: ВТ1-0 900–1000 °С; ВТ14 1050–1150 °С; ВТ15 1000–1100 °С; ВТ20 1050–1150 °С; ТС5 950–1100 °С; ТС6 1150–1200 °С; ПТ7-М 950–1050 °С.

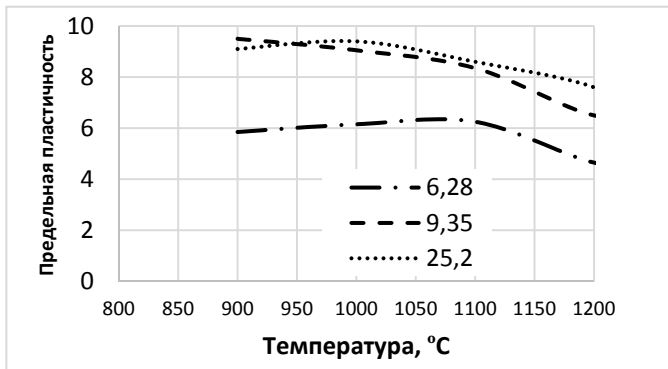
Ранее [5] было показано, что температура нагрева заготовки перед деформацией должна быть скорректирована на величину разогрева металла в процессе деформации.



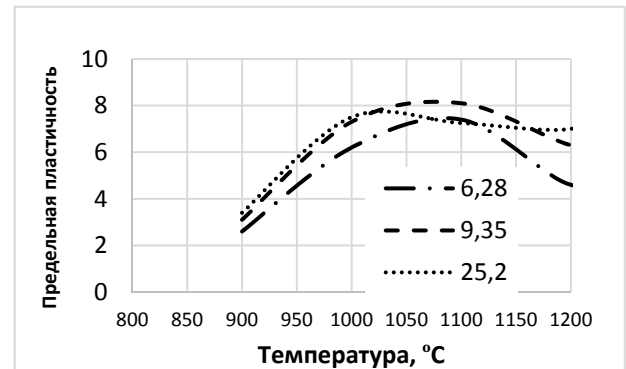
а



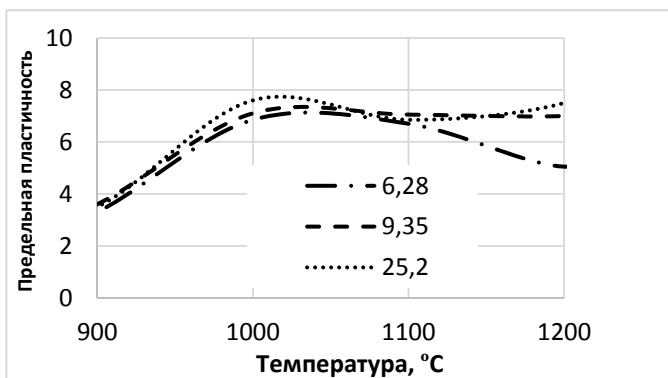
б



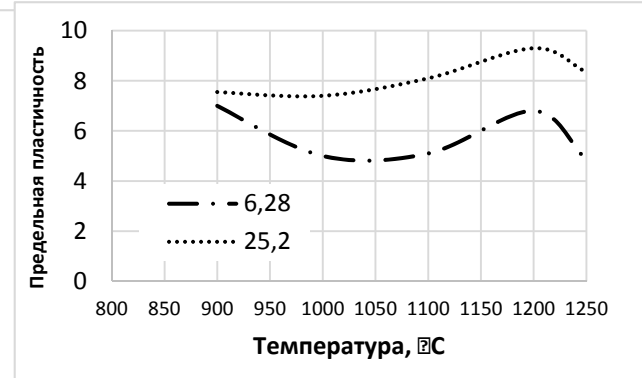
в



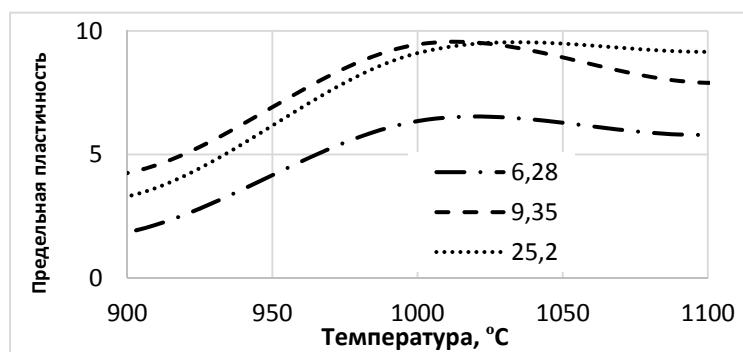
г



д



е



ж

Рис. 3. Графические зависимости степени деформации сдвига от температуры испытаний: а – VT1-0; б – VT14; в – VT15; г – VT20; д – TC5; е – TC6; ж – PT7-M

ВЫВОДЫ

Экспериментально определены кривые зависимости крутящего момента от угла закручивания образца на изменение сопротивления деформации металла. Установлено, что на первом этапе происходит интенсивное деформационное упрочнение металла. На втором участке кривой происходит разупрочнение металла по механизму динамического возврата при существенном увеличении степени деформации за счет осуществления поперечного скольжения. Третий участок характеризуется резким снижением сопротивления деформации образца, которое заканчивается его разрушением.

Предложена и рассмотрена методика оценки пластичности металлов, на примере титановых сплавов, при кручении образцов. Построены графические зависимости степени деформации сдвига в зависимости от температуры испытаний. Определен температурный интервал максимальной пластичности при обработке давлением для сплавов ВТ1-0; ВТ14; ВТ15; ВТ20; ТС5; ТС6; ПТ7-М.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин С. И. *Пластическая деформация металлов: в 3 т.* / С. И. Губкин. – М. : *Металлургиздат*. – 1961.
2. *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов* / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : *Изд-во Урал. ун-та*, 2014. – 137 с.
3. Pernis R. *Application of the torsion test in calculating the extrusion force* / [Pernis R., Bidulská J., Kvačák T., Pokorný I.] // *Archives of metallurgy and materials*. – Vol. 56 (1). – 2011. – Pp. 81–85. – DOI: 10.2478/v10172-011-0009-9.
4. Колмогоров В. Л. *Пластичность и разрушение* / В. Л. Колмогоров. – М. : *Металлургия*, 1977. – 336 с.
5. Медведев М. И. *Деформируемость металлов при горячем прессовании труб* : дис. канд. : 05.16.05 / М. И. Медведев. – Днепропетровск, 1974. – 194 с.
6. Yang L. H. *Determination of hardening coefficient of large strain constitutive model based on torsion tests* / L. H. Yang, L. Z. Wu // *Advanced materials research*. – Vol. 197-198. – 2011. – Pp. 1528–1531. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.1528.
7. Надаи А. *Пластичность и разрушение твердых тел* / А. Надаи. – М. : *Мир*, 1969. – 863 с.
8. Медведев М. И. *Совершенствование процесса прессования труб* / М. И. Медведев, Ю. Г. Гуляев, С. А. Чукмасов. – М. : *Металлургия*, 1986. – 151 с.

REFERENCES

1. Gubkin S. I. *Plasticheskaia deformacija metallov: v 3 t.* / S. I. Gubkin. – M. : *Metallurgizdat*. – 1961.
2. *Tehnologicheskie i jekspluatacionnye svojstva titanovyh splavov* / A. G. Illarionov, A. A. Popov. – Ekaterinburg : *Izd-vo Ural. un-ta*, 2014. – 137 s.
3. Pernis R. *Application of the torsion test in calculating the extrusion force* / [Pernis R., Bidulská J., Kvačák T., Pokorný I.] // *Archives of metallurgy and materials*. – Vol. 56 (1). – 2011. – Pp. 81–85. – DOI: 10.2478/v10172-011-0009-9.
4. Kolmogorov V. L. *Plastichnost' i razrushenie* / V. L. Kolmogorov. – M. : *Metallurgija*, 1977. – 336 s.
5. Medvedev M. I. *Deformiruemost' metallov pri gorjachem pressovanii trub* : dis. kand. : 05.16.05 / M. I. Medvedev. – Dnepropetrovsk, 1974. – 194 s.
6. Yang L. H. *Determination of hardening coefficient of large strain constitutive model based on torsion tests* / L. H. Yang, L. Z. Wu // *Advanced materials research*. – Vol. 197-198. – 2011. – Pp. 1528–1531. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.1528.
7. Nadai A. *Plastichnost' i razrushenie tverdyh tel* / A. Nadai. – M. : *Mir*, 1969. – 863 s.
8. Medvedev M. I. *Sovershenstvovanie processa pressovanija trub* / M. I. Medvedev, Ju. G. Guljaev, S. A. Chukmasov. – M. : *Metallurgija*, 1986. – 151 s.

Медведев М. И. – д-р техн. наук, ст. науч. сотруд. каф. ОМД НМетАУ;
Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД НМетАУ;
Андреев В. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД НМетАУ;
Бобух А. С. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД НМетАУ;
Беспалова Н. А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотруд. каф. ОМД НМетАУ.

E-mail: frolov@metal-forming.org ; andreiev@metal-forming.org ; bobukh@metal-forming.org

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

Статья поступила в редакцию 18.10.2018 г.