

Деформування титанового сплаву VT1-0 зі субмікрокристалічною структурою при статичному навантаженні

Б. С. Карпінос^а, Д. В. Павленко^б, О. Я. Качан^б

^а Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^б Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

Виконано порівняльний аналіз деформування сплаву VT1-0 при статичному навантаженні у литому та субмікрокристалічному стані, що отриманий методом інтенсивної пластичної деформації гвинтовою екструзією. Установлено, що характеристики пружності та короточасної міцності сплаву в субмікрокристалічному стані підвищені. Після пластичної деформації модуль пружності зменшується, а модуль зміцнення підвищується.

Ключові слова: сплав VT1-0, модуль пружності, міцність, субмікрокристалічна структура.

Вступ. Протягом останніх десятиріч у різних галузях техніки інтенсивно використовуються сплави зі субмікрокристалічною структурою (СМС), або об'ємні нано-матеріали. Зменшення розмірів структурних елементів, у першу чергу зерен і субзерен, до 100...200 нм зумовлює такий комплекс фізичних, механічних і технологічних властивостей цих матеріалів, що вигідно відрізняє їх від металів і сплавів у звичайному (грубозернистому) стані. Наприклад, в [1–5] встановлено, що для матеріалів зі СМС спостерігається істотне підвищення характеристик міцності і твердості при збереженні високого рівня пластичності.

Із позицій термодинаміки матеріали зі СМС можна розглядати як нерівноважні системи, в яких через зовнішні механічні і термічні умови одночасно і послідовно на макро- і мікрорівнях відбуваються різні фізико-хімічні процеси та перетворення. Перетворення в матеріалі залежно від параметрів і характеру зовнішньої дії можуть сприяти як збільшенню, так і зменшенню значення відповідної характеристики. Наявність декількох процесів зумовлює у деяких випадках максимум або мінімум досліджуваної характеристики.

Відомо, що механічні характеристики, особливо міцність, відображують шлях переходу матеріалу з одного термодинамічного стану в інший. Їх значення залежать не тільки від параметрів зовнішньої дії, а й від того, яким чином експериментально здійснювався цей перехід. Шляхів досягнення кінцевого стану матеріалу може бути багато. Найбільш об'єктивну і надійну інформацію при визначенні характеристик статичної міцності, втоми, механіки руйнування, технологічних властивостей матеріалу можна отримати на основі експериментальних досліджень. Обґрунтовані дослідження дозволяють розв'язати задачі оптимального пошуку факторів зовнішньої дії, що забезпечують можливість використання нових перспективних матеріалів у сучасних об'єктах авіаційної і космічної техніки, енергетиці. У першу чергу це стосується дослідження характеристик пружності і статичної міцності, феноменології опису кривих деформування.

Мета даної роботи заключається в експериментальному дослідженні деформування сплаву ВТ1-0 при статичному навантаженні у початковому литому та субмікрокристалічному стані. Це дало можливість з'ясувати безпосередній вплив екструзії на характеристики матеріалу, на відміну від досліджень [5, 6], де цей сплав перед екструзією попередньо деформувався та додатково термооброблявся.

Методика дослідження та обговорення результатів. Зразки виготовляли із заготовок сплаву ВТ1-0, отриманого методом електрошлакового переплаву, у початковому литому стані та після інтенсивної пластичної деформації в осьовому напрямку. Відомо, що у цьому напрямку характеристики міцності найменші. Інтенсивної пластичної деформації сплаву досягали методом гвинтової екструзії (twist extrusion) у Фізико-технічному інституті ім. А. А. Галкіна НАН України за технологією, що описана в роботі [5], на установці з гвинтовою матрицею прямокутного перетину (25×40 мм) і кутом нахилу $\beta_{\max} = 45^\circ$ (рис. 1). Довжина заготовки l становила 70 мм. Тиск пресування p_1 складав 1600 МПа. Для збільшення технологічної пластичності титанового сплаву до переднього кінця заготовки прикладався протитиск $p_2 = 200$ МПа, а також використовувалась суміш на основі легкоплавкого скла. Виконувалось п'ять проходів гвинтової екструзії.

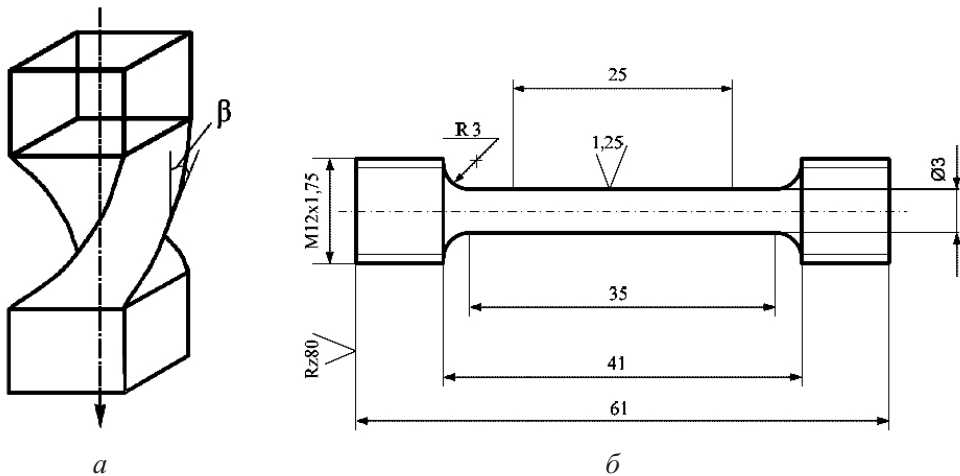


Рис. 1. Схема гвинтової екструзії (а) і зразок для випробувань на розтяг (б).

Заготовки попередньо нагрівали в печі опору до температури $T = 400^\circ\text{C}$. Зразки зі злитку вирізали електроерозійним способом (рис. 1). Подальша механічна обробка забезпечила необхідну їх форму та параметри якості робочої поверхні.

Металографічне дослідження структури виконували на просвічуючому електронному мікроскопі JEM-100CXII при прискорювальній напрузі 100 кВ. Тонкі фольги виготовляли за стандартною методикою.

Результати дослідження структури матеріалу у початковому литому стані і після гвинтової екструзії показали, що внаслідок складного напруженого стану в ній відбуваються істотні незворотні зміни (рис. 2). Компоненти шарового тензора і девіатора напружень зумовлюють дроблення структур-

них складових сплаву, формування розвиненої зеренно-субзеренної структури, збільшення довжини границь зерен і субзерен та об'ємної частки потрійних стиків. Середній розмір структурних складових сплаву після гвинтової екструзії, визначений методом січних, складав 200...500 нм, у той час як розмір зерен у початковому литому стані – 150...300 мкм.

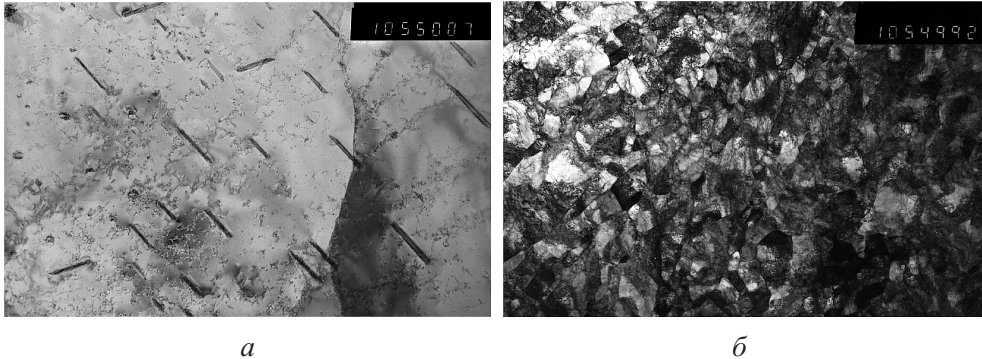


Рис. 2. Мікроструктура сплаву VT1-0 у початковому литому стані (а) і після гвинтової екструзії (б) ($\times 10000$).

Експериментальні дослідження виконували на серво-гідралічній машині INSTRON 8802 при програмному навантаженні за кімнатної температури. База екстензометра становила 25 мм. У процесі випробувань деформацію робочої частини зразка контролювали з точністю $\delta = \pm 1$ мкм. Точність вимірювання напружень $\Delta\sigma$ у робочому перерізі зразка досягала ± 3 МПа. Показання екстензометра і пружного динамометра відцифровувалися за допомогою аналого-цифрового перетворювача і накопичувалися в ЕОМ з дискретністю $\Delta t = 0,01$ с.

Програма досліджень полягала в наступному. Зразки послідовно навантажували і розвантажували в межах пружного деформування. За характеристику пружності приймали січний модуль E та визначали початок пластичної деформації. Після цього зразки на ділянці пластичної деформації декілька разів навантажували–розвантажували і далі навантажували до втрати стійкості деформації. Відлік деформації при кожному навантаженні починався з нуля. Результати дослідів статистично обробляли.

Сплав VT1-0 у початковому литому стані. На рис. 3 наведено експериментальні результати деформації зразка при навантаженні–розвантаженні до напруження $\sigma = 200$ МПа. Установлено, що залежність між напруженням σ і деформацією ε задовільно апроксимується лінійними рівняннями:

при навантаженні –

$$\sigma = 36,4098 + 103656,565\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,962), \quad 0 < \varepsilon < 0,0015; \quad (1)$$

при розвантаженні –

$$\sigma = 32,0318 + 103975,89819\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,9541), \quad 0 < \varepsilon < 0,0015. \quad (2)$$

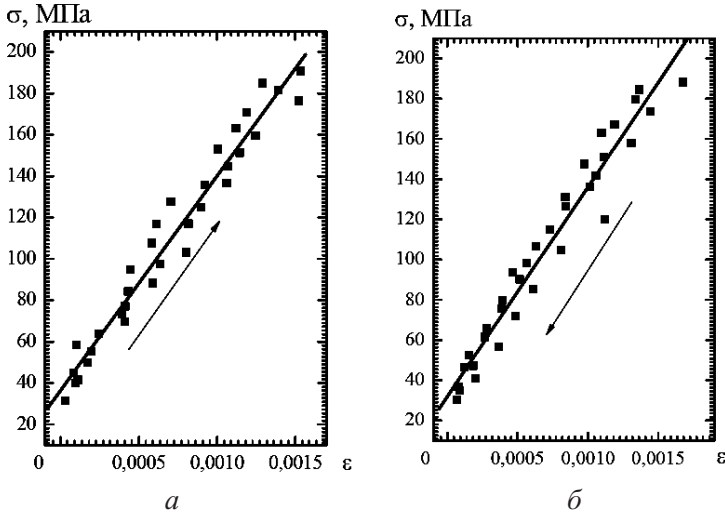


Рис. 3. Пружна деформація сплаву ВТ1-0 при навантаженні (а) і розвантаженні (б).

Коефіцієнти кореляції R^2 для рівнянь (1), (2) мало відрізняються від середнього значення $R^2 \approx 0,96$. При навантаженні і розвантаженні січний модуль пружності $E = 103,6$ ГПа. Далі досліджували пружно-пластичну деформацію сплаву ВТ1-0 (рис. 4). За початок пластичної деформації приймали появу залишкових деформацій $\epsilon_{\text{зал}} = 0,0005$ при напруженнях $\sigma = 225$ МПа (рис. 4,а).

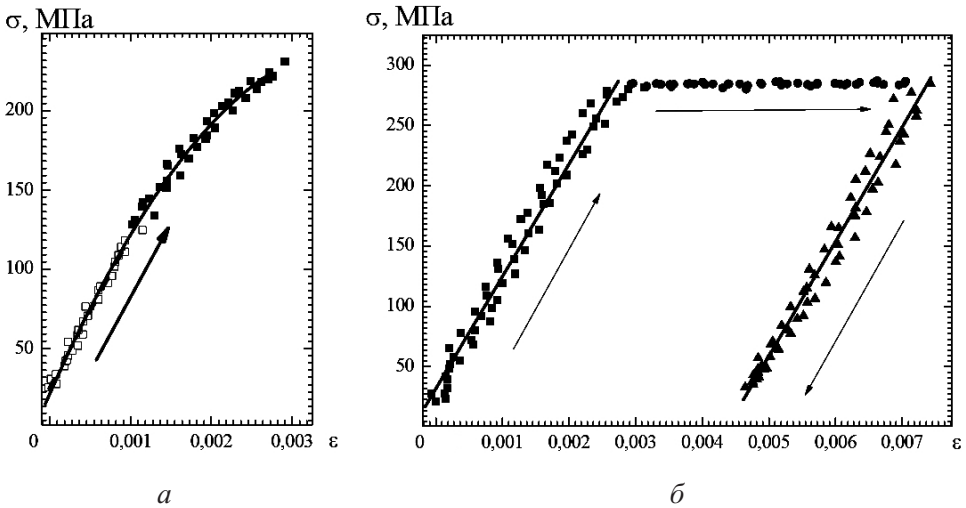


Рис. 4. Пружно-пластична деформація сплаву ВТ1-0.

Навантаження до деформації $\epsilon = 0,007$ дозволило встановити межу текучості $\sigma_{0,2} = 275$ МПа з допуском $\epsilon_{\text{зал}} = 0,002$ (рис. 4,б).

При розвиненій пластичній деформації залежності $\sigma = f(\epsilon)$ мають три ділянки, які описуються наступними рівняннями:

при навантаженні –

$$\sigma = 31,83559 + 92995,9692\varepsilon, \text{ МПа} \quad (R^2 = 0,96727), \quad 0 < \varepsilon < 0,0027; \quad (3)$$

при зміцненні –

$$\sigma = 282,61035 + 317,99819\varepsilon, \text{ МПа} \quad (R^2 = 0,9385), \quad 0,0027 < \varepsilon < 0,007; \quad (4)$$

при розвантаженні –

$$\sigma = -415,36237 + 94837,72415\varepsilon, \text{ МПа} \quad (R^2 = 0,97159), \quad 0,0044 < \varepsilon < 0,007. \quad (5)$$

Кінцевим етапом дослідження сплаву в початковому литому стані був ще один цикл пружно-пластичної деформації зразка до $\varepsilon = 0,007$. Після цього його навантажували до втрати стійкості деформації і таким чином визначали межу міцності матеріалу σ_B (300 МПа) і граничне подовження ε_{lim} (0,052). Усі етапи деформації ілюструє рис. 5.

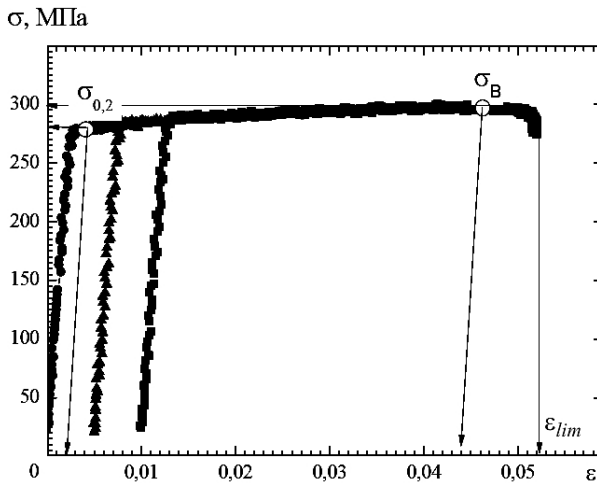


Рис. 5. Узагальнена крива деформації сплаву VT1-0 у початковому литому стані.

Сплав VT1-0 після гвинтової екструзії. З урахуванням закономірностей деформації зразків зі сплаву VT1-0 у початковому литому стані після гвинтової екструзії їх піддавали пружно-пластичній деформації до $\varepsilon = 0,007$ з розвантаженням і навантаженням (рис. 6). Результати досліджень свідчать про підвищення значення межі текучості до $\sigma_{0,2} = 412$ МПа в порівнянні з таким для зразків у початковому стані та деяке збільшення модуля пружності E .

Криві розвантаження і навантаження мало відрізняються між собою. Модуль пружності E при розвантаженні дорівнює 99,688 ГПа, при навантаженні – 109,562 ГПа. Процес деформування описується залежностями:

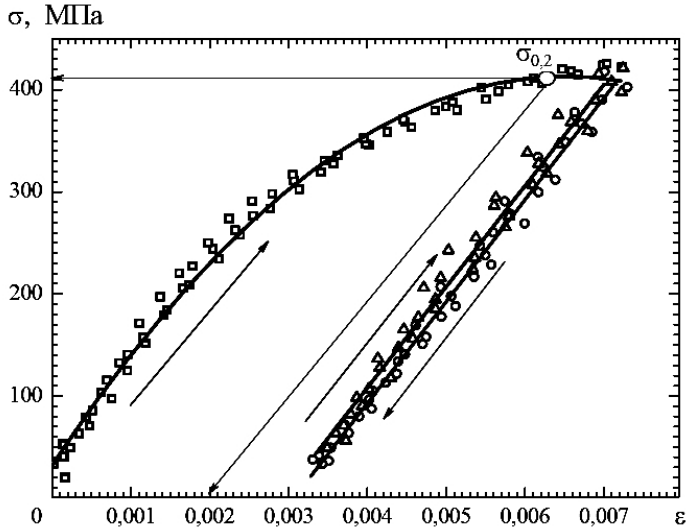


Рис. 6. Пружно-пластична деформація сплаву ВТ1-0 після гвинтової екструзії.

для пружної ділянки –

$$\sigma = 25,22802 + 113068,65102\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,94), \quad 0 < \varepsilon < 0,0027;$$

при розвантаженні –

$$\sigma = -305,77476 + 96198,754\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,9731), \quad 0,003 < \varepsilon < 0,007;$$

при навантаженні –

$$\sigma = -287,12343 + 109562,521\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,9589), \quad 0,003 < \varepsilon < 0,007.$$

Далі зразки навантажували до $\varepsilon = 0,0075$, потім розвантажували і знову навантажували до рівня напружень $\sigma = 462$ МПа. Результати досліджень наведено на рис. 7. Отримано такі вирази, що описують різні ділянки деформації:

початкова пружна –

$$\sigma = 40,88543 + 101410,491\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,98), \quad 0 < \varepsilon < 0,004;$$

зміцнювання –

$$\sigma = 400,51 + 91,124\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,903), \quad 0,004 < \varepsilon < 0,007;$$

розвантаження –

$$\sigma = -253,25694 + 87710,50267\varepsilon, \quad \text{МПа} \quad (R^2 = 0,9754), \quad 0,0027 < \varepsilon < 0,007;$$

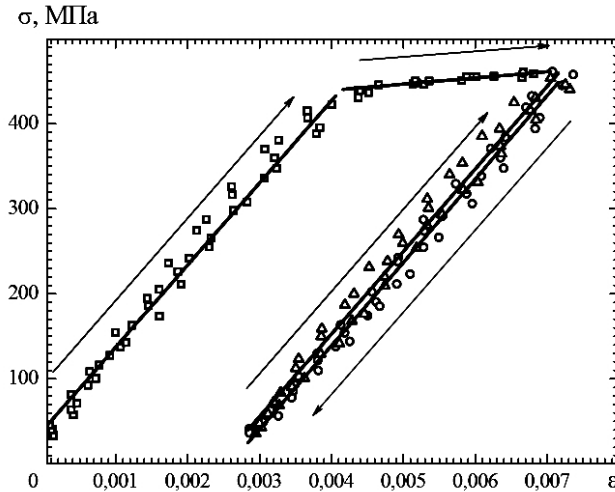


Рис. 7. Деформування сплаву VT1-0 після гвинтової екструзії до рівня великих пластичних деформацій.

навантаження –

$$\sigma = -235,63718 + 98817,52396\varepsilon, \text{ МПа} \quad (R^2 = 0,938), \quad 0,0027 < \varepsilon < 0,007.$$

Кінцевим етапом дослідження було доведення зразків до втрати стійкості, що відбувалося при загальній деформації $\varepsilon_{lim} = 0,022$ (рис. 8). Ще до втрати стійкості деформації, а саме: при $\varepsilon = 0,022$, відмічалася границя міцності сплаву $\sigma_B = 475$ МПа. Модуль пружності E при цьому становив 97,18 ГПа.

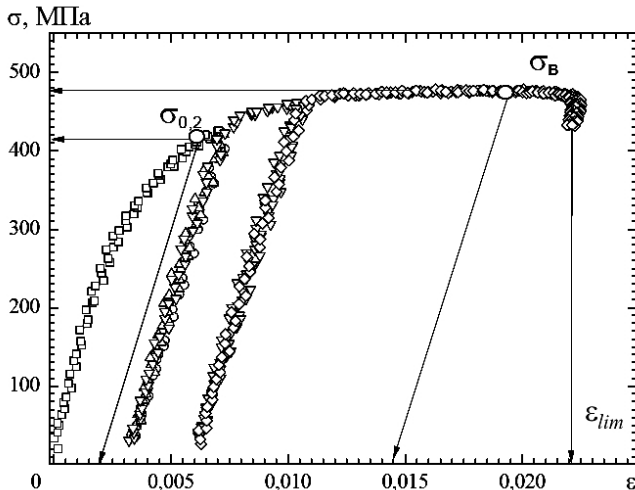


Рис. 8. Узагальнена крива деформації сплаву VT1-0 після гвинтової екструзії.

Порівняння характеристик міцності сплаву у початковому литому стані і після гвинтової екструзії наведено на рис. 9 і в таблиці. Гвинтова екструзія сприяє збільшенню майже на 50...60% границь текучості та міцності й

одночасно зменшенню майже на 60% граничного подовження. При цьому приблизно у два рази зменшується робота пружно-пластичної деформації. У таблиці також наведено відповідні характеристики, що одержані для сплаву при попередній початковій пластичній деформації. Порівняння відношень $\frac{(\sigma_{\text{в}})_{\text{гв.екстр}}}{(\sigma_{\text{в}})_{\text{п}}}$ з $\frac{(\sigma_{0,2})_{\text{гв.екстр}}}{(\sigma_{0,2})_{\text{п}}}$ для сплаву, що мав різний початковий стан в осьовому напрямку, свідчить про інтенсивний вплив екструзії на характеристики міцності литого сплаву.

Характеристики сплаву ВТ1-0 до і після гвинтової екструзії

Стан матеріалу	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	ϵ_{lim}	$\frac{(\sigma_{\text{в}})_{\text{гв.екстр}}}{(\sigma_{\text{в}})_{\text{п}}}$	$\frac{(\sigma_{0,2})_{\text{гв.екстр}}}{(\sigma_{0,2})_{\text{п}}}$
Початковий литий	103,6	275	300	0,052	1,000	1,000
Після гвинтової екструзії	113,0	412	475	0,022	1,588	1,498
Початковий деформований*	–	400	470	0,300	1,000	1,000
Після гвинтової екструзії*	–	486	541	0,120	1,215	1,152
		440	471	0,130	1,100	1,002
Після гвинтової екструзії та термообробки*	–	417	473	0,150	1,042	1,006
		465	523	0,150	1,162	1,112

Примітка. Зірочкою позначено результати досліджень [6].

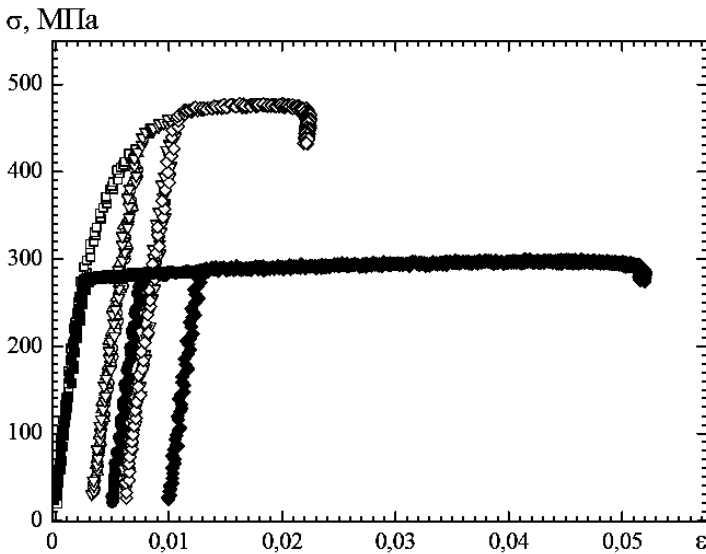


Рис. 9. Залежність напруження σ від деформації ϵ сплаву ВТ1-0 у початковому литому стані (темні точки) і після гвинтової екструзії (світлі точки).

На підставі отриманих результатів (рис. 9) встановлено емпіричні залежності впливу пластичної деформації ε на модуль пружності E сплаву VT1-0 у початковому литому стані

$$E = 97,6984 + 6,34021 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,00201}\right), \text{ ГПа} \quad (R^2 = 0,9762)$$

та зі субмікроструктурною структурою

$$E = 97,18359 + 16,13838 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,00496}\right), \text{ ГПа} \quad (R^2 = 1).$$

Ці залежності справедливі при $0 < \varepsilon < 0,02$. Їх довільний член має практично однакові значення.

Таким чином, значення модулів пружності до і після екструзії сплаву VT1-0 асимптотично наближаються до сталого, яке відрізняється від початкового приблизно на 10%.

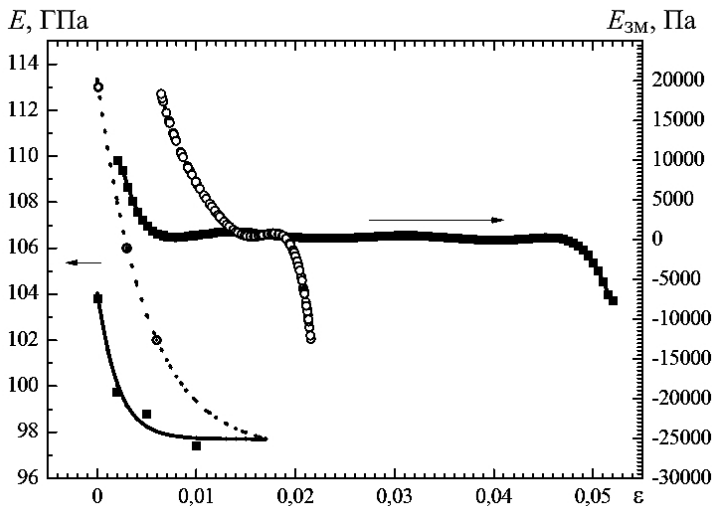


Рис. 10. Залежність модулів пружності E і зміщення E_{3M} від деформації ε сплаву VT1-0 у початковому литому стані (темні точки) і після гвинтової екструзії (світлі точки).

На рис. 10 наведено залежність модулів пружності E і зміщення $E_{3M} = d\sigma/d\varepsilon$ від рівня пластичної деформації. Відзначається деяке коливання E_{3M} , особливо для матеріалу в початковому литому стані.

Висновки

1. Експериментальне дослідження деформування зразків зі сплаву VT1-0 у початковому литому стані та зі субмікроструктурною структурою при статичному навантаженні показало, що межі текучості і міцності після гвинтової екструзії збільшуються у 1,5...1,6 рази при одночасному зменшенні граничного подовження.

2. Модулі пружності у початковому литому стані і після гвинтової екструзії порівняно з рівнем пластичної деформації зменшуються незначно.

3. Гвинтова екструзія сприяє суттєвому зростанню модуля зміцнення.

Автори висловлюють щирю подяку В. Е. Філатову за плідну співпрацю при проведенні дослідів.

Резюме

Выполнен сравнительный анализ деформирования сплава ВТ1-0 при статическом нагружении в литом и субмикроструктурном состоянии, полученного методом интенсивной пластической деформации винтовой экструзией. Установлено, что характеристики упругости и кратковременной прочности сплава в субмикроструктурном состоянии повышенные. После пластической деформации модуль упругости уменьшается, модуль упрочнения увеличивается.

1. *Малыгин Г. А.* Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // *Физика твердого тела.* – 2007. – **49**, вып. 6. – С. 961 – 982.
2. *Валиев Р. З., Александров И. В.* Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
3. *Герасимчук О. Н., Сергиенко Г. А., Бондарчук В. И. и др.* Сопротивление усталости ($\alpha + \beta$)-титанового сплава класса Ti-6Al-4V, полученного методом электронно-лучевого осаждения в вакууме из паровой фазы // *Пробл. прочности.* – 2006. – № 6. – С. 113 – 121.
4. *Герасимчук О. М., Налімов Ю. С., Марковський П. Є. та ін.* Вплив мікроструктури титанових сплавів на характеристики опору втомі // *Там же.* – 2011. – № 3. – С. 67 – 82.
5. *Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г.* Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. – Донецк: ТЕАН, 2003. – 87 с.
6. *Столяров В. В., Салимгареев Х. Ш., Сошникова Е. П. и др.* Влияние комбинированной обработки давлением на структуру и свойства титана ВТ1-0 // *Физика и техника высоких давлений.* – 2003. – **13**, № 1. – С. 54 – 59.

Поступила 10. 09. 2009