

ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ХОЛОДНОЙ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

П.А.Ермоленков¹, Д.А. Храмова²

¹Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт материалов», 191014, Санкт-Петербург, ул. Парадная, 8, e-mail: info@cniim.com;

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, e-mail: komdep@bstu.spb.su

Изучено влияние холодной пластической деформации кручения на титановый сплав марки ТС6 в горячекатаном состоянии. Эффективность упрочнения оценивалась по диаграммам кручения и растяжения, упрочненных кручением образцов. Влияние упрочнения кручением представляет практический интерес при производстве пружин.

Ключевые слова: сдвиговые напряжения, упрочнение, пластическая деформация, кручение, растяжение, титановый β -сплав.

В современных механизмах машин, приборов и аппаратов большую роль играют различные упругие элементы, прежде всего пружины различных конструкций. Пружины, применяемые в изделиях ответственного назначения, должны обладать высокой стабильностью силовых характеристик, при должном уровне циклической долговечности и релаксационной стойкости, сохраняющихся весь срок эксплуатации пружины в изделии. Одним из способов формирования необходимых характеристик является метод холодной пластической деформации в сочетании с термической обработкой сплава.

Упрочнение холодной пластической деформацией кручением, совмещенной с низкотемпературной термической обработкой, изучалось на примере титанового сплава марки ТС6, относящегося к псевдо β -сплавам. Обладая высокой склонностью к упрочнению методами термомеханической обработки, сплав ТС6 позволяет получить в упрочнённом состоянии высокий уровень прочностных ($\sigma_b \geq 1500$ МПа) и упругих ($\sigma_{пл} \geq 1200$ МПа) характеристик при удовлетворительной пластичности ($\delta \geq 4\%$) [1]. Благодаря сочетанию высоких механических свойств, низких модулей упругости и

сдвига ($E = 108$ ГПа, $G = 39,2$ ГПа) и малой плотности ($\rho = 4,95$ г/см³), сплав обеспечивает самые высокие (по занимаемому ими объему и массе) из известных металлических материалов характеристики энергоемкости пружин сжатия (растяжения) $W_p = \tau_{32}/4G_p$ или кручения $W_p = \sigma_{32}/8E_p$ (здесь символом τ_3 обозначаются максимальные касательные напряжения, а символом σ_3 – максимальные нормальные напряжения в пружине) [2,3]. Кроме того, как и все титановые сплавы, сплав ТС6 обладают высокой коррозионной стойкостью, а также, обладая механически стабильной β -структурой, имеющей ОЦК решетку, высокими технологическими свойствами, хорошо деформируется в холодном состоянии, что позволяет проводить волочение проволоки с большими степенями деформации (до 50 – 80%) как из горячекатаного состояния поставки, так и после промежуточной закалки [4]. Следует отметить, что помимо термомеханического упрочнения сплава с помощью волочения, значительным может быть вклад сдвиговых деформаций, применяющихся при производстве пружин (навивка, заневоливание).

¹Ермоленков Павел Алексеевич – инженер 1-ой категории отдела 123, тел.: +7 (921)564-77, e-mail: P.A.Ermolenkov@yandex.ru;

²Храмова Дария Алексеевна – старший преподаватель кафедры «Механика деформируемого твердого тела», тел.:+7 (951)666-22-52 e-mail: khdaria@mail.ru



Эффективность упрочнения за счет сдвиговой деформации оценивалась по диаграммам кручения и растяжения упрочненных кручением образцов. Исходное состояние материала образцов – горячекатаный пруток диаметром 8 мм сплава ТС6 производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Исследование упрочнения сдвиговой пластической деформацией производилось на образцах диаметром 8 мм и длиной рабочей части 80 мм. На рис.1 представлен эскиз

образца. Испытания проводились на машине кручения типа TNS-DW05. Угол кручения образцов не превышал 1000°. Закручивание образцов чередовалось с термической обработкой - нагрев 300 °С в течение часа, затем образцы испытывались на растяжение. Испытания на растяжение проводились на машине SHIMADZU AG - X-1.

На рис.2 представлены характерные диаграммы кручения и растяжения. Результаты обработки диаграмм приведены в таблице 1.

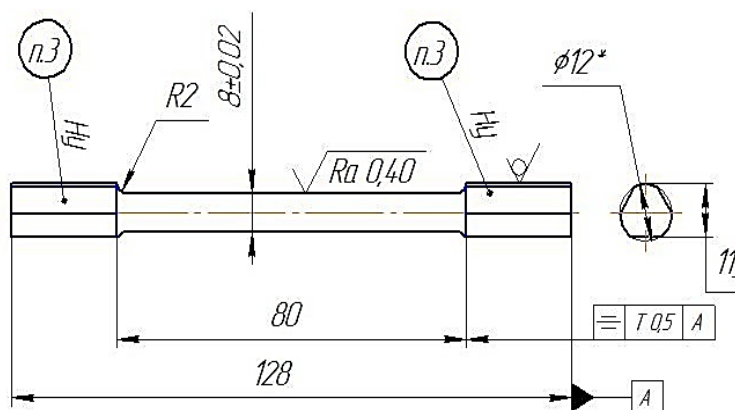


Рисунок 1 – Эскиз образца

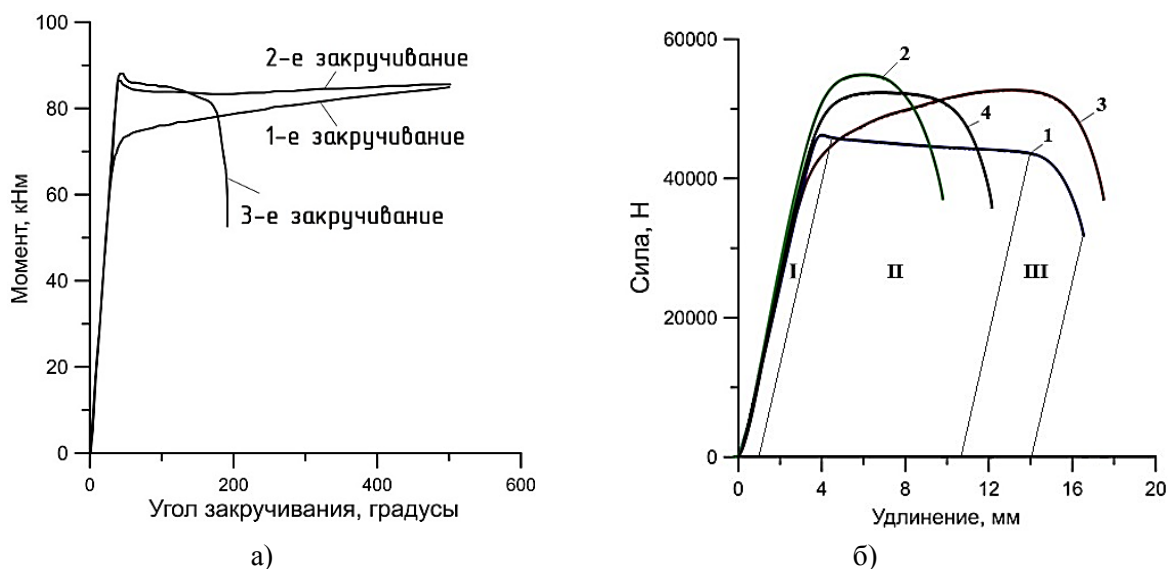


Рисунок 2: а) – Диаграммы кручения образцов из сплава ТС 6; б) – Диаграммы растяжения закрученных образцов по различным режимам из сплава ТС 6. (1- исходное состояние; 2-500 ° → по часовой → 500 ° против часовой; 3-500 ° по часовой → т/о → 500 ° по часовой; 4-500 ° по часовой → т/о → 500 ° по часовой → т/о)

На диаграмме кручения образцов (рис.2а) показано три последовательных закручивания образца номер 3 (табл.1). При первом закручивании упрочнение холодной

пластической деформацией происходит наиболее интенсивно. При втором и третьем закручивании положительного эффекта на упрочнение материал не наблюдается,

происходит микрорастрескивание материала. По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что для достижения положительного эффекта упрочнения материала достаточно одного закручивания.

Для исходного состояния сплава (рис.2б, кривая 1) характерно наличие «зуба», с быстрым выходом на «пиковое» значение прочности (участок I), т.е материал

имеет значение условного предела текучести, близкое к пределу прочности ($\sigma_{0,2} \geq 0,9\sigma_s$) и при дальнейшей деформации образца в процессе испытаний на растяжение, уменьшение площади поперечного сечения образца преобладает над процессами упрочнения материала. В результате чего усилие деформации образца снижается (участок II).

Таблица 1 – Результаты обработки диаграмм

Режим обработки	Механические свойства				
	При растяжении			При кручении	
	σ_s МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta\%$	τ_r МПа	τ_{max} МПа
1.Исходное состояние	899,7	-	20,6	-	-
2.Кручение: 500° по часовой → 500° против часовой	1094,7	1015,1	9,5	746,4	-
3.Кручение: 500° по часовой → т/о → 500° по часовой	1039	835	18,8	-	865,8
4.Кручение: 500° по часовой → т/о → 500° по часовой → т/о	1035	975	12	-	870,8

При достижении значения относительного удлинения 8-15% происходит локализация деформации образца в зоне шейки и его разрушение (участок III).

При испытании на растяжение образцов из холоднодеформированного материала, процессы доупрочнения материала в процессе деформации испытываемого образца происходят более интенсивно, поэтому на диаграммах растяжения наблюдается большая разница значений $\sigma_{0,2}$ и σ_s (рис.2б, кривые 2-4).

Деформация кручением (образец 2) приводит к упрочнению материала (σ_s увеличивается с 899,7 МПа до 1094,7 МПа), но при этом происходит значительное падение пластичности материала (с 14% до 7%). Введение промежуточной разупрочняющей термической обработки (образец 3), приводит к незначительному снижению максимально достигнутого уровня прочности (σ_s образца 2 = 1094,7 МПа и σ_s образца 3 = 1039 МПа), но позволяет существенно сохранить пластические характеристики материала ($\delta = 14-15\%$), что должно положительно сказаться на усталостной стойкости материала

с такой обработкой. Повторное введение термической обработки (образец 4) после двух актов закручивания, приводит к дополнительной потере прочности (σ_s образца 3 = 1030 МПа и σ_s образца 4 = 1035 МПа), но дополнительно снижает пластичность ($\delta = 8\%$), что может быть вызвано появлением Ω -фазы.

Анализируя результаты, полученные после деформации образцов кручением и испытаний на растяжение (рис.2), с результатами упрочнения сплава ТС6 при волочении проволоки (рис. 3, табл. 2) [2], можно сделать вывод о том, что достигнутый уровень механических свойств, полученный при кручении образцов, эквивалентен деформации волочением, равной 8 – 10%. Столь малый уровень эквивалентной деформации можно объяснить неравномерностью деформации кручением по сечению образца: в поверхностных зонах деформации максимальны, в то время как центральные области образца практически не подвержены сдвиговым деформациям.



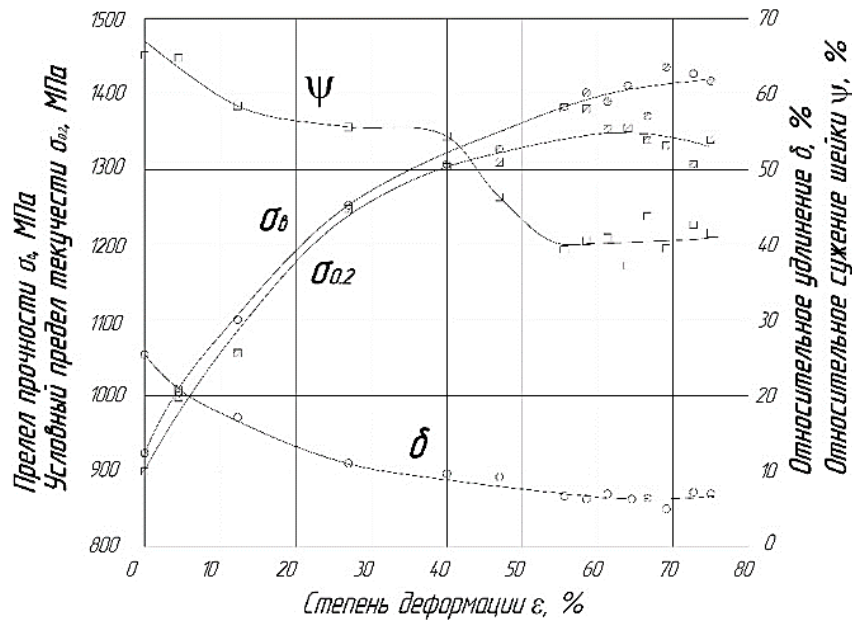


Рисунок 3 – Диаграмма волочения горячекатаного прутка диаметром 8 мм из сплава ТС6 в состоянии поставки

Таблица 2 – Механические свойства сплава ТС6 при степени деформации 8-10% (справочная к рисунку 3)

ε, %	σ _в , МПа	σ _{0.2} , МПа	δ, %	Ψ, %
0	910	880	25	68
8	1084	998	21	65
14	1100	1050	16	56
28	1240	1210	12	54
40	1310	1300	8	52
55	1350	1320	6	40
65	1380	1330	5	38
75	1390	1310	5	40

Несмотря на то, что деформации кручения вносят малый вклад в суммарную степень деформации, но все же должны учитываться при изготовлении пружин для полного понимания процессов, происходящих с материалом пружины в процессе ее производства. Поэтому необходимо продолжить исследования процессов холодной пластической деформации.

Список литературы

1. Шаболдо, О.П. Термомеханическое упрочнение титанового β- сплава ТС6 / О.П. Шаболдо, Я.М. Виторский // Вопросы материаловедения. - 2012.-№2(70).-С.45-53.
2. Шаболдо, О.П. Создание пружинного материала на основе высокопрочного титанового β-сплава марки ТС6 / О.П. Шаболдо, Я.М. Виторский, Е.А. Караштин // «ЦНИИ материалов - 100 лет на благо России» - Санкт-Петербург, - 2012г.- с.158-168.
3. Шаболдо, О.П. Пружинные материалы со специальными свойствами из труднодеформируемых высокопрочных высоколегированных термомеханически упрочняемых сплавов на основе титана, никеля и ниобия / О.П. Шаболдо, Я.М. Виторский, Е.А. Караштин, Е.В. Васильев, М.В.Сорокин // Металлообработка. - 2011.-№2 (62). - С. 28-35.
4. Шаболдо О.П., Строганов А.А. Влияние термомеханических режимов производства проволоки на механические свойства пружинного β-титанового сплава ТС6// Металлообработка. - 2010.- №1 (55). - С. 50-56.