

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ТЕНЗОМЕТРИИ

В представленной статье раскрыты вопросы определения модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии. Представлены схемы нагружения, методики определения модуля упругости при разных видах деформации, описаны достоинства и недостатки применения средств тензометрии.

Ключевые слова: модуль упругости, тензометрия, твердые сплавы, термообработка, испытания.

Использование методов тензометрии при определении модуля упругости различных материалов подвергнутых термообработке позволяет значительно уменьшить погрешность определения, а значит увеличить точность определения влияния того или иного вида обработки на модуль упругости материала.

В статье рассматриваются способы и результаты определения модуля упругости различных материалов до и после их термической обработки.

Прочность на изгиб измеряли нагружением образца установленного на двух опорах на базе 30 мм для штабиков и 15 мм для пластин. Определение прочности на изгиб проводили на универсальной разрывной машине модели ИР5047-50-10 с погрешностью ± 1 Н, с помощью приспособления для определения напряжения изгиба, изготовленного по ТУ 5808-0085 с учетом ГОСТ 9391-80.

Схемы нагружения показаны на рисунке 1. Результаты фиксировались многоканальной тензометрической станцией ММТС-64.01. Предел погрешности измерений этой системы не превышает 0,1 %.

Напряжения при изгибе и сжатии определялись по формулам, соответственно

$$\sigma = M/W_x, \quad \sigma = F/A,$$

где $M = F \times l$ – изгибающий момент;

F – максимальная нагрузка деленная на два;

l – расстояние от опоры до середины образца;

$W_x = b \times h^2 / 6$ – момент сопротивления поперечного сечения образца, m^3 ;

b, h – ширина и высота поперечного сечения образца соответственно, м;

$A = b \times h$ – площадь поперечного сечения образца, m^2 .

Для измерения относительной продольной деформации использовались проволоочные тен-

зодатчики на плёночной или бумажной основе с базой 5 или 10 мм.

Выбор приклеиваемых тензодатчиков в качестве основного вида преобразователей относительной деформации в электрический сигнал обусловливается рядом их положительных свойств: высокой точностью преобразования деформации в изменение Омического сопротивления; практически неограниченным частотным диапазоном; малыми габаритными размерами и весом, не оказывающими влияния на объект исследования; дистанционность измерения.

Относительную продольную деформацию определяли по формуле

$$\varepsilon = \Delta l \times k,$$

где Δl – показатель, рассчитанный по показаниям измерителя деформации ММТС-64.01, по методике описанной в руководстве по эксплуатации ММТС-64.01 [1];

k – тарировочный коэффициент, рассчитываемый на основе информации указанной в сопроводительной документации к используемым тензодатчикам.

Определение модуля нормальной упругости проводили по формуле

$$E = \sigma_{\text{сред}} / \varepsilon_{\text{сред}}.$$

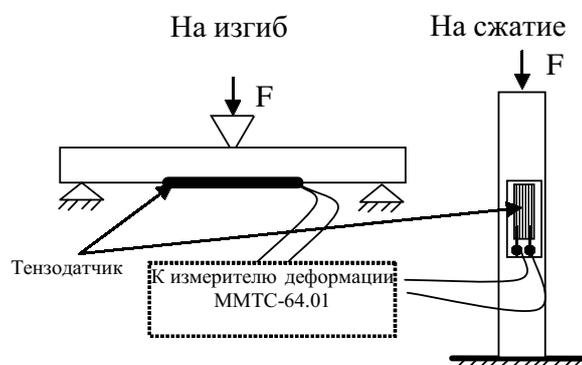


Рисунок 1. Схемы нагружения образцов

Значения σ и ϵ выбирали как средние с графика зависимости относительной деформации от нормального напряжения.

Проводили испытания на определение модуля упругости образцов из порошкового материала СП100 при сжатии и изгибе [2].

После проведения экспериментов строили графики зависимости нормального напряжения при изгибе или сжатии от относительной продольной деформации (рисунок 2).

Анализ графика, приведённого на рисунке 2, показывает на незначительную разницу значений модуля нормальной упругости при сжатии и изгибе (в среднем разница не превышает 7,8%).

Таким образом, в расчётах на прочность и жесткость деталей машин из порошковой стали СП100 необходимо учитывать наличие нелинейной разномодульности этого материала.

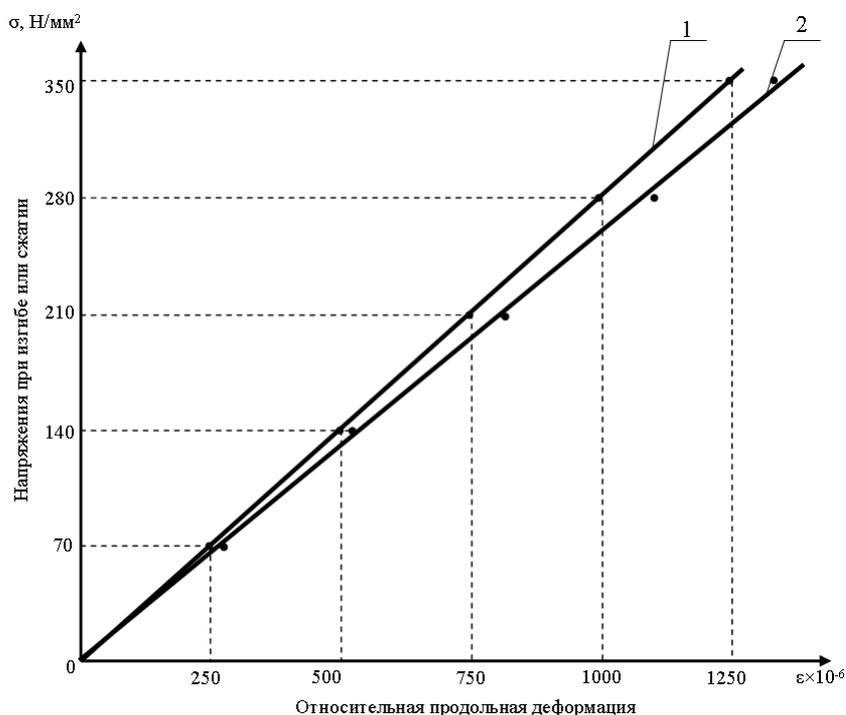
Для определения влияния вида термообработки (далее ТО) на модуль упругости твердых сплавов провели ТО, которая включала в себя: отжиг; многократная закалка с нагревом токами высокой частоты (далее ТВЧ) в среде аргона; многократная закалка в электролите; отпуск; термическая обработка в соляных ваннах [3].

В опытах использовались образцы 5×5×35 мм из материала ВК8 и Т14К8 производства Кировоградского завода твердых сплавов.

Для отжига в муфельную печь ПМ-14М помещали графитовый тигель с образцами из материала ВК8 внутри. В опыте использовали пять образцов. Для предотвращения обезуглероживания в тигель засыпали графитовый порошок, после чего нагревали печь до 1100 °С, в течении 5 часов. После 2-х часовой выдержки при этой температуре выключали печь и проводили медленное охлаждение вместе с печью, в течении 10 часов.

Закалку образцов токами высокой частоты осуществляли с помощью высокочастотного генератора ВЧИ100/0,066-3П. Нагрев проводили до заданной температуры (таблица 1). Температуру нагрева фиксировали оптическим пирометром SH60.

Закалку в электролите осуществляли с помощью устройства, разработанного на кафедре МТМ ОГУ. Нагрев образцов ВК8 осуществляли до 1100 °С в десятипроцентном растворе HCl в воде. Проводилась однократная, двукратная и трехкратная закалка с нагревом в



1 – при изгибе ($E=0,9 \times 10^5$ Н/мм² – модуль нормальной упругости); 2 – при сжатии ($E=0,97 \times 10^5$ Н/мм² – модуль нормальной упругости)

Рисунок 2. Зависимость относительной деформации от напряжения при сжатии или изгибе для материала СП100

электролите. Затем производили охлаждение в том же растворе.

В муфельную печь ПМ-14М помещали графитовые тигли с закаленными образцами внутри. Отпускали до температур, указанных в таблице 1, затем проводили изотермическую выдержку в течение одного часа и охлаждали образцы на спокойном воздухе.

Для выявления изменения характера зависимости между нагрузкой и деформацией (считая напряжением при изгибе и относительной деформацией) использовались датчики на бумажной основе с базой 5 мм и сопротивлением 200 Ом. К образцам тензодатчики приклеивали с помощью молекулярного клея, затем высушивали при температуре 20 °С в течении 24 ч.

Результаты фиксировали микропроцессорной многоканальной тензометрической системой ММТС-64.01 (рисунок 3).

По показаниям ММТС-64.01 строили графики зависимости между нормальным напряжением при изгибе и относительной деформацией (рисунок 4).

Анализ графиков, представленных на рисунке 4, позволяет сделать вывод, о влиянии термообработки на модуль упругости твердого сплава ВК8.

После всех видов ТО модуль упругости снижается, максимально после пятикратной закалки ТВЧ, на 16 %.

Термическую обработку твердого сплава марки Т14К8 проводили на оборудовании ла-

Таблица 1. Режимы термообработки образцов ВК8

№ опыта	Вид термообработки	Температура нагрева	Кратность нагрева	Время нагрева, с	Твердость	Предел прочности при изгибе
		T _{нагр} , °С			HV	σ _{изг.} , Н/мм ²
1	ТВЧ	1150	1	40	1720	1450
2		600	1	20	1570	1780
3*		900	1	30	1560	1230
4		1150	5	40	1500	1800
5	Отжиг	1100	1	5/2/10 часов	1420	1350
6	Закалка в электролите	1100	1	10	1630	1340
7		1100	2	10	1830	1200
8		1150	3	10	1650	1250
9	Исходный				1540	1680

* Отожженные образцы

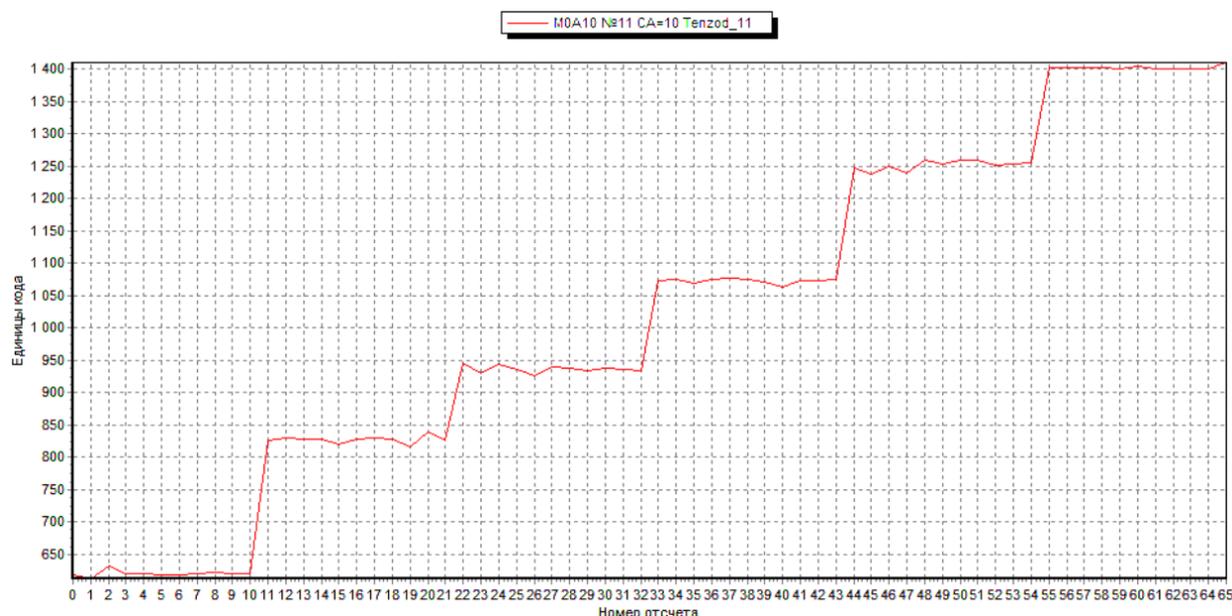


Рисунок 3. Пример показаний ММТС-64.01 во время нагружения штабиков материала ВК8 закаленных ТВЧ до 1150 °С

боратории кафедры материаловедения и технологии материалов ОГУ и на ПО «Стрела» (г. Оренбург) с использованием для нагрева соляных ванн типа СП2 и СП3 и охлаждением в различных средах и в муфельной печи ПМ-14.

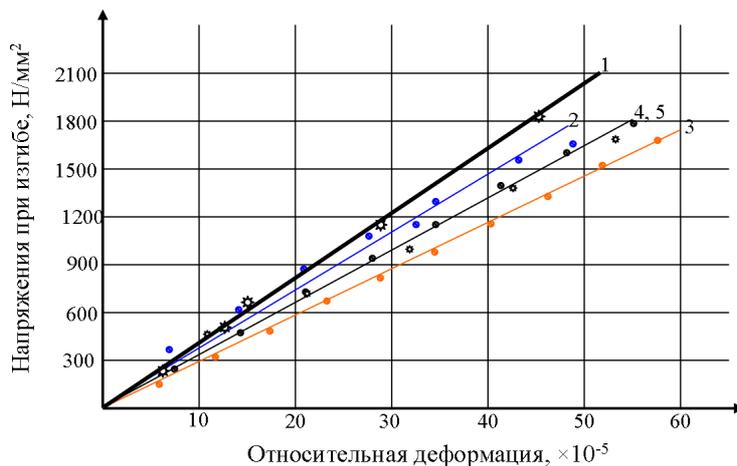
Был принят режим термообработки в расплаве солей, представленный на схеме (рисунок 5).

После ТО образцы отмывали от соли в 10% растворе серной кислоты, и перед определением модуля упругости зачищали на алмазном диске.

Лучшие режимы термообработки для штабиков Т14К8 – $T_{\text{нор}} = 1050^\circ\text{C}$, без отпуска, прочность – 2200 Н/мм^2 , при этом достигнуто увеличение прочности в 1,7 раза.

Анализ результатов установления экспериментальных зависимостей между напряжением и продольной деформацией показал, что у термообработанных образцов материала Т14К8 напряжение при изгибе имеет больший коэффициент отношения напряжения при изгибе и относительной деформации на 14% (рисунок 6).

При термоциклировании твердых сплавов ВК8, нагрев производился на высокочастотной установке индукционного нагрева ВЧИ100/0,066-ЗП. Чтобы исключить окисление твердых сплавов при термоциклировании нагрев проводили в среде аргона с использованием кварцевых трубок.



1 – исходный, нетермообработанный; 2 – закалка в электролите (однократная); 3 – пятикратная закалка ТВЧ; 4 – отжиг 1100°C ; 5 – закалка ТВЧ 1150°C

Рисунок 4. Зависимость между нормальным напряжением при изгибе и относительной деформацией после термообработки материала ВК8

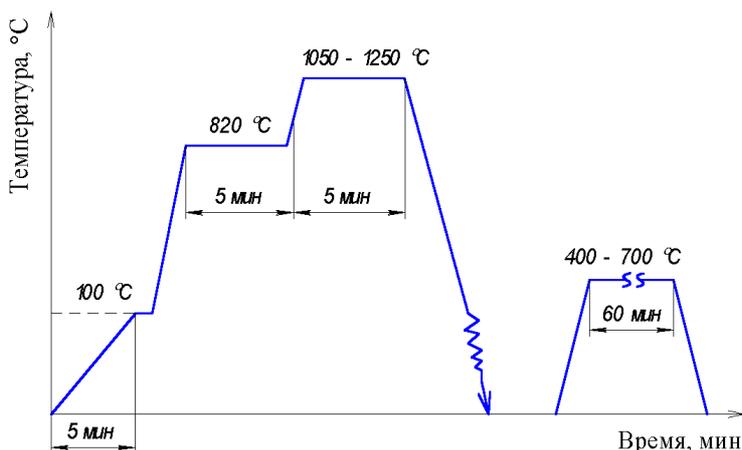


Рисунок 5. Схема термической обработки твердосплавных образцов Т14К8

Таблица 2. Зависимость относительной продольной деформации от напряжения по данным тензометрии

Материал							
У10		Р6М5		ВК8 _{терм.}		ВК8 _{исходный}	
$\sigma_{\text{изг}}, \text{Н/мм}^2$	$\epsilon \times 10^{-5}$						
22	9	27	12	36,8	11,8	24,3	4,7
44	18	54	30	73,6	19,47	48,6	7,7
66	27	81	41	108	25	97,2	17
88	39,5	108	55	147	32	121,5	23
110	50,7	-	-	180	38	170,1	28
132	60	-	-	220	42	194,4	33
-	-	-	-	258	47	218,7	38
-	-	-	-	294	52	243	42

Разрушение тензорезистора (тензодатчика)

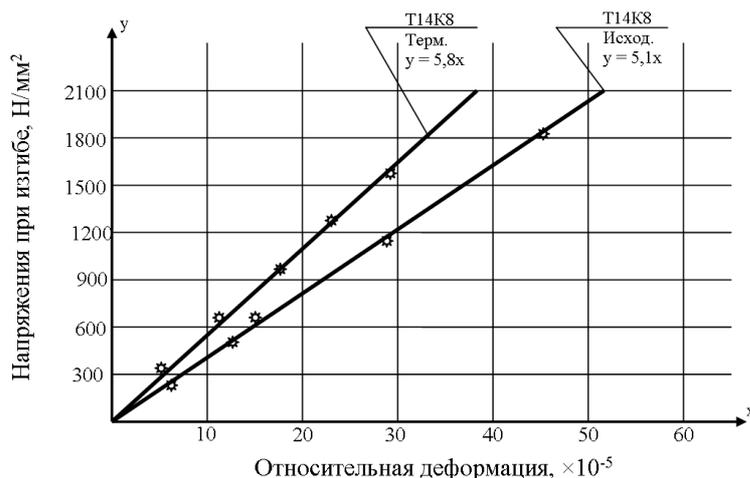
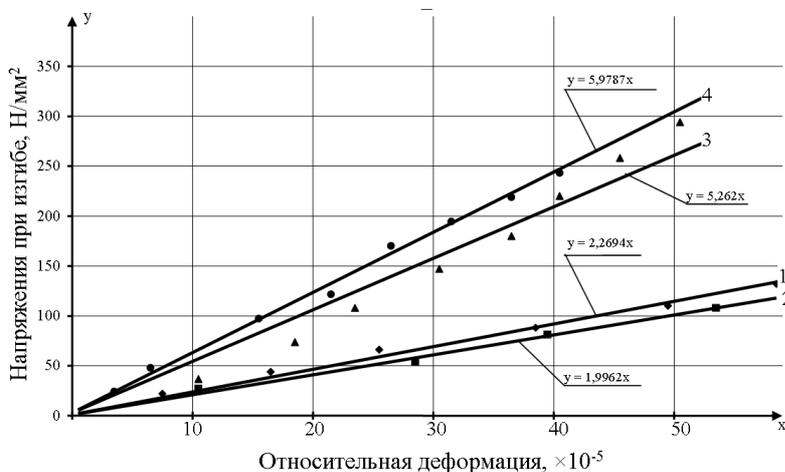


Рисунок 6. Зависимость между нормальным напряжением при изгибе и относительной деформацией до и после термообработки твердого сплава Т14К8



1 – сталь У10, $\sigma_{изг} = 5652 \text{ Н/мм}^2$, $T_{з} = 780 \text{ }^\circ\text{C}$ в масле, время нагрева 3 мин., $T_{отп} = 180 - 214 \text{ }^\circ\text{C}$, твердость – 746 - 804 HV; 2 – сталь Р6М5, $T_{зак} = 1220 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержка 2 мин., $T_{отп} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, 2-хкратно, твердость – 804 - 868 HV; 3 – твердый сплав ВК8, $T_{нагр} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждение в аргоне, циклирование 5 раз, относительная износостойкость - 2,6, твердость - 1235 HV, $\sigma_{изг} = 2300 \text{ Н/мм}^2$; 4 – твердый сплав ВК8, исходный, твердость - 1650 HV, $\sigma_{изг} = 1500 \text{ Н/мм}^2$

Рисунок 7. Зависимость нормального напряжения при изгибе от относительной деформации для различных материалов

После термообработки, также образцы испытывали на изгиб с использованием тензометрии, для выявления изменения характера зависимости между нагрузкой и деформацией (таблица 2, рисунок 7).

При анализе данного рисунка видно, что коэффициент зависимости (модуль нормальной упругости) между нормальным напряжением и относительной деформацией после тер-

моциклирования для материала ВК8 незначительно, но уменьшился (на 12%), для сравнения испытывали и другие материалы.

После проведенной работы, видно, что использование методов тензометрии позволяет с достаточной степенью точности определять влияние видов и режимов термообработки на физические константы материалов.

10.02.14

Список литературы:

1. Руководство по эксплуатации «Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01». РУ-02/2062-01.01. ФГУП «Сибирский НИИ авиации им. С. А. Чаплыгина». – Новосибирск, 2007. – 262 с.

2. Богодухов, С.И. Физико-механические свойства разномодульных материалов при статических испытаниях / С.И. Богодухов [и др.] // Высокие технологии в машиностроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Курган, 21–23 ноября 2012 г.). – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. – С. 88–89. – ISBN 978-5-4217-0185-9.
3. Богодухов, С.И. Термическая обработка твердого сплава Т14К8 / С.И. Богодухов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). – Москва : Изд-во «Машиностроение». – 2012. – № 12, декабрь. – С. 41–44. – ISSN 1684-1107.

Сведения об авторах:

Богодухов Станислав Иванович, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов
Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Гарипов Владимир Станиславович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической
механики Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук

Солосина Екатерина Валерьевна, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов

Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел.: (3532)773419; 372511,

e-mail: matm@mail.osu.ru; ogu@mailgate.ru