

## Определение кривых упрочнения и диаграмм пластичности компонентов композиционных сверхпроводников

*А.А. Шабашов*

*Уральский федеральный университет*

*им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

**Аннотация:** Для определения интенсивности касательных напряжений сдвига, интенсивности деформаций и микротвердости для всех компонентов шины предложены методики исследований кривых упрочнения и диаграмм пластичности компонентов композиционных сверхпроводников. Полученные результаты можно использовать для определения энергосиловых параметров прокатки и определения условия прокатки без разрушения.

**Ключевые слова:** Интенсивность касательного напряжения, интенсивность деформации, микротвердость, композит, сверхпроводник, энергосиловой параметр, прокатка, условие прокатки без разрушения.

Для решения инженерных задач необходимы кривые упрочнения и диаграммы пластичности всех компонентов композиционных сверхпроводников. Поперечный разрез конструкции композиционной сверхпроводящей шины показан на рис. 1.

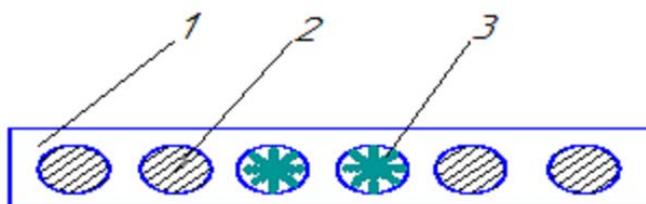


Рис. 1. Конструкция сверхпроводящей шины:

1 – гальваническая медь; 2 – медь марки МВ; 3 – сверхпроводящий провод.

Особенность сверхпроводников в том, что невозможно выделить и испытать каждый компонент композиции в отдельности. Сверхпроводящие волокна имеют шероховатую поверхность [1] и диаметр меньше микрометра. Шероховатость является концентратором напряжений и, кроме того, не позволяет точно определить площадь поперечного сечения волокон. Это вызывает необходимость косвенной оценки значений напряжений и деформаций волокон и других компонентов композиции [2]. В качестве наиболее доступного метода косвенной оценки напряженного состояния можно использовать метод измерения микротвердости [3].

При построении зависимости напряжений, деформаций и микротвердости микротвердость связывают с приведенными напряжениями в условиях пластичности. Наиболее распространенными являются условия Треска-Сен-Венана и Мизеса (максимальное касательное напряжение) и интенсивность касательных напряжений) [4-7]. Лучшее подтверждение получило условие Мизеса [8].

На основании этого по данным значениям микротвердости, можно определить соответствующие значения интенсивности касательных напряжений и интенсивности деформаций в любой точке.

При одноосном напряженном состоянии степень деформации сдвига при растяжении плоского образца определяется по формуле [9]:

$$\Lambda = \sqrt{3} \ln(1 - \delta), \quad (1)$$

где  $\delta$  – относительное удлинение образца

Интенсивность касательных напряжений:

$$\Gamma = \frac{P}{F_0} \sqrt{3} \frac{1}{1 - \psi}, \quad (2)$$

где  $P$  – растягивающее усилие;

$F_0$  – площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытания;

$\Psi$  – относительное сужение поперечного сечения образца.

При осадке цилиндрических образцов для определения степени деформации сдвига используется зависимость [9]:

$$\Lambda = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (3)$$

В случае сведения сил трения к нулю на площадке контакта торцов образцов с бойками интенсивность касательных напряжений:

$$\Gamma = \frac{P}{F_0} \sqrt{3(1 - \varepsilon)}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительное обжатие образца.

Для определения интенсивности касательных напряжений при больших степенях деформаций проведено волочение композиционного сверхпроводящего провода (волокна из сплава НТ-50 а матрице из меди марки МВ), при этом расчет суммарной степени деформации сдвига определялся по методике[1]:

$$\Lambda = \Lambda_i \frac{\ln \eta_{\Sigma}}{\ln \eta_i}, \quad (5)$$

где  $\Lambda_i$  - степень деформации за проход;

$\eta_{\Sigma}$  - суммарная вытяжка;

$\eta_i$  - вытяжка за проход.

Интенсивность касательных напряжений рассчитывалась по формуле (2)

Далее определили кривую упрочнения для гальванической меди на кольцевых образцах [10].

Трудности экспериментального определения сопротивления деформации и кривой упрочнения гальванической меди заключается в выборе вида испытания.

Исследования показали, что наиболее перспективными являются образцы в виде колец. Имеющиеся в литературе формулы для определения усилия трения при осадке кольцевых образцов [10], не дают готовых решений по расчету интенсивности деформаций сдвига. В связи с этим было предложено определять кривую упрочнения гальванической меди для кольцевых образцов с использованием теории пластического течения.

В соответствии условиями трения на торцах колец задача решалась при допущении, что касательные силы, действующие на торцах образцов, малы (это возможно при осадке на хорошо смазанных полированных бойках). Поскольку деформация кольца близка к однородной, силы контактного трения по всей торцевой поверхности направлены к оси симметрии кольца, а координата  $R$ , при которой радиальная скорость  $V_r = 0$ , удовлетворяет неравенству  $R_k \leq R_B$  (рис. 2).

Принимая деформацию заготовки по высоте равномерной и из условия постоянства объема, можно записать функции для скоростей перемещения в осевом и радиальном направлениях:

$$V_z = V \frac{Z}{h}; \quad V_r = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{R_k}{r} \right)^2 \right] \frac{V}{h} r \quad (6)$$

Для этого случая:

$$R_K = \sqrt{1 - 2 \frac{\Delta R_n}{R_n} \frac{h}{\Delta h}} R_n \quad (7)$$

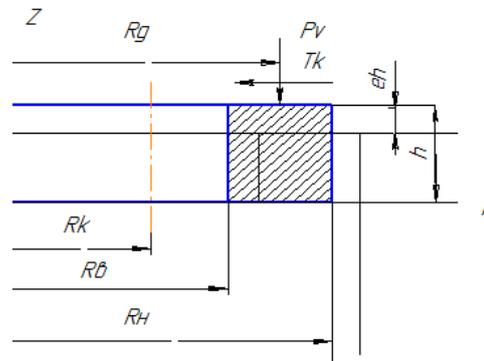


Рис. 2. Очаг деформации для случая  $R_K \leq R_B$

Величина  $R_K$  находится из экспериментальных данных. Для этого измеряют параметры, входящие в правую часть выражения (7). Экспериментальное определение величины  $R_K$  позволяет однозначно задать поле скоростей и проверить условие  $R_K \leq R_B$ , которое, как уже отмечалось, выполняется лишь при действии на торцах кольца малых сил трения.

В соответствии с характером поставленной задачи задаем усредненные по площади скольжения силы контактного трения по закону

Кулона:

$$\tau_{\text{ср}} = \mu P_{\text{ср}},$$

$$\text{где } P_{\text{ср}} = \frac{P}{\pi(R_N^2 - R_B^2)} \quad (8)$$

Среднее удельное давление сжатия кольца находим из уравнения баланса мощности:

$$PV = \int_{vk} \tau_s H dV + \int_{sk} \mu P V ds_r \quad (9)$$

где  $V_k$  и  $S_r$  - площадь торцевой поверхности кольца.

Из уравнения баланса мощности после преобразования с сохранением достаточной для инженерных расчетов точности определяем:

$$\tau_s = \frac{P_{cp}}{\sqrt{3}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \mu \left( 1 - \frac{R_K^2}{R_g^2} \right) \frac{R_g}{h} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{R_o^{34}}{R_g^4}}}{1 + \frac{1}{3} \frac{R_K^4}{R_N^2 R_B^3}} \right] \quad (10)$$

При  $\mu = 0$ , из формулы (10) следует, что  $\tau_s = \frac{P_{cp}}{\sqrt{3}}$  и  $P_{cp} = \tau_s$

Следовательно, когда  $\mu = 0$ , формула (10) верно описывает случай однородной деформации. Коэффициент трения подлежит экспериментальному определению.

Степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \int_{\tau_N}^{\tau} H d\tau = \sqrt{3} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{R_K^4}{r^4}} \int_h^{h_1} \frac{dh}{d\tau} = \sqrt{3} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{R_K^4}{r^4}} \ln \frac{h}{h - \Delta h}, \quad (11)$$

Степень деформации сдвига, усредненная по объему очага деформации, может быть представлена в виде:

$$\Lambda_{cp} = \sqrt{3} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{R_K^4}{r^4}} \ln \frac{h}{h - \Delta h}, \quad (12)$$

С увеличением коэффициента трения координата  $R_K$  также увеличивается, в результате чего величина  $R_K$  принимает значение,

соответствующее неравенству  $R_B \leq R_K \leq R_N$ . Схема очага деформации при этом случае показана на рис. 2.

Функции для поля скоростей описываются зависимостью (6), поэтому значение функции  $R_K$  осталось без изменений.

После преобразования уравнения (9) и вычислений получим при  $R_B \leq R_K \leq R_N$

$$\tau_s = \frac{P_{cp}}{\sqrt{3}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \mu \frac{R_g}{h} \left( \frac{R_K^2}{R_g^2} - 1 \right) + \frac{R_g}{h} \left( 1 - \frac{R_k^2}{R_g^2} \right) \right] \left[ \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{R_o^4}{R_g^4}}}{1 + \frac{1}{3} \frac{R_K^4}{R_N^2 R_B^3}} \right] \quad (13)$$

Степень деформации сдвига при  $R_B \leq R_K \leq R_N$  вычисляется по формуле (13). Выражения (10), (12) и (13) использовали для построения кривой упрочнения гальванической меди в поперечном направлении сверхпроводящей шины.

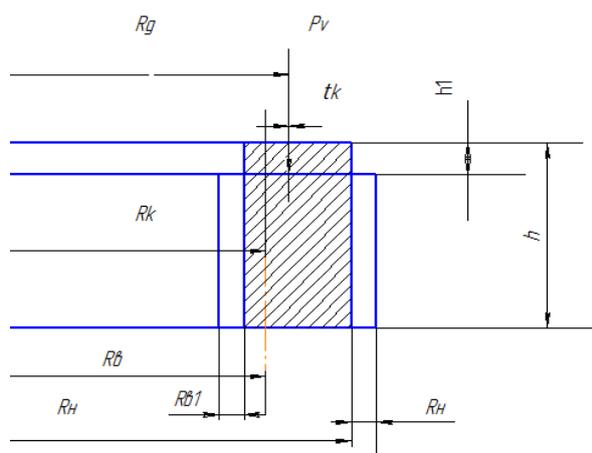


Рис. 3. Очаг деформации для случая

$$R_B \leq R_K \leq R_N$$

Результаты определения зависимости напряжение-деформация и напряжение-деформация-микротвердость были обработаны методами статистического и корреляционно-множественного анализа.

В результате статистической обработки нашли дисперсию микротвердости, доверительный интервал и коэффициент вариации  $V$ .

Уравнения регрессии, аппроксимирующие значения  $T, \Lambda, H_\mu$  записывали в виде(10):

$$Y = e^A x^\alpha \quad (14)$$

$$Y = B + \beta x \quad (15)$$

Аргументы уравнений получались методом наименьших квадратов. Вид уравнений выбирался по максимальному значению коэффициентов множественной корреляции.

В результате статистической обработки измерений микротвердости на образцах из сплава НТ-50, меди марки МВ и гальванической меди определено, что при доверительной вероятности 0,95 коэффициент вариации микротвердости не превосходит 7%.

На рис. 4 показаны зависимости интенсивности касательных напряжений сдвига для НТ-50 от интенсивности деформаций и от микротвердости.

По данным аппроксимации, корреляция между величинами  $T, \Lambda$  и  $H_\mu$  выражена сильно ( $r = 0,9$ ). Следовательно, сопротивление деформации у

сплава НТ-50 при комнатной температуре можно определить по значению микротвердости.

На рис. 5 и 6 графически изображены зависимости  $T$ - $\Lambda$ - $H_{\mu}$  для меди марки МВ и гальванической меди корреляция между величинами  $T$ ,  $\Lambda$  и  $H_{\mu}$  выражена сильно ( $r = 0,9$ ).

В соответствии с феноменологической теорией деформируемости металлов без разрушения [9], если формоизменение происходит при постоянном показателе напряженного состояния, а процесс близок к монотонному, условие деформирования без разрушения:

$$\Lambda \leq \Lambda_p [K]$$

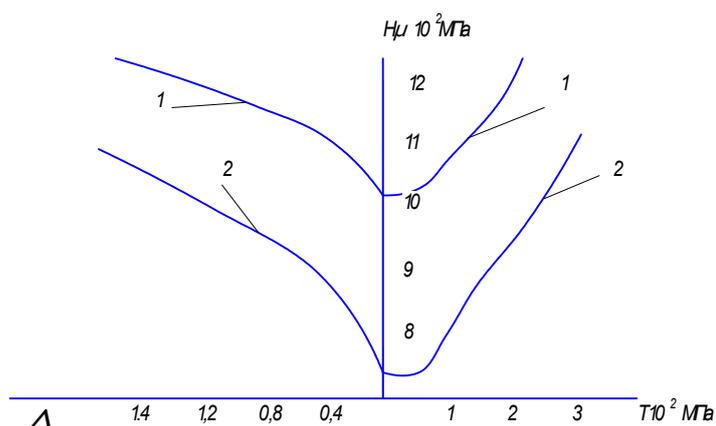


рис. 4. Зависимость интенсивности касательных напряжений сдвига для НТ-50 от интенсивности деформаций и от микротвердости:

1 - для НТ-50; 2 - для меди марки МВ.

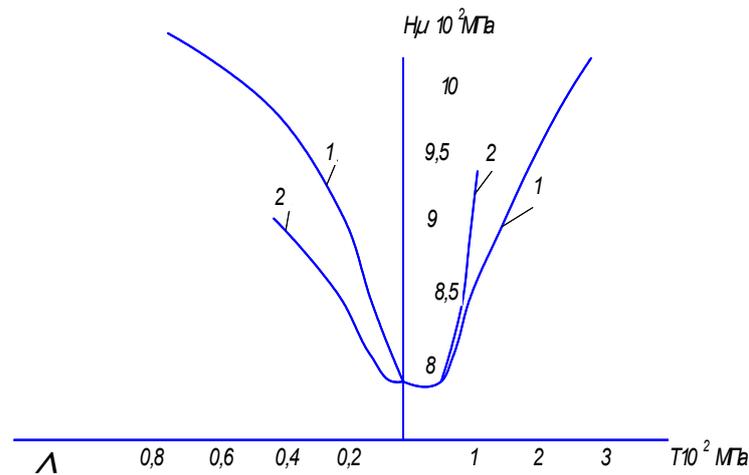


Рис. 6. Зависимость интенсивности касательных напряжений сдвига для электролитической меди от интенсивности деформаций и от микротвердости:

1 - в поперечном направлении электролитической шины (испытание на сжатие); 2 – в продольном направлении электролитической шины (испытание на растяжение).

$$\text{или } \psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p [K]} \leq 1.$$

Характер изменения пластичности меди и марки МВ и сплава НТ-50 показан на рис.7. Для меди она аппроксимирована выражением:

$$\Lambda_p = 10,5 \Lambda_{\text{exp}} 1,07 K$$

(16)

Для сплава НТ-50 – выражением:

$$\Lambda_p = 10,0 \Lambda_{\text{exp}} 1,17 K \quad (17)$$

Испытанию подвергались образцы из сплава НТ-50 в исходном недеформируемом состоянии [11]. Поэтому для определения трещиноватости провода, подверженного многократному волочению без отжига волокон из сплава НТ-50, необходимо учесть суммарную деформацию волочения и с учетом показателя напряженного состояния определить трещиноватость после волочения [12]. Затем к полученному значению прибавить трещиноватость от прокатки композиции.

Трещиноватость в  $j$ -ом волокне  $I$ -ого прохода:[1,12]

$$\Psi_{ji} = \frac{1}{\Lambda_{pj} [K_{cp}]} (\sqrt{3} \ln \mu + 2 \operatorname{tg} \alpha) \quad (18)$$

В соответствии с полученными результатами [11] расчетная диаграмма пластичности для волокон из сплава НТ-50 после волочения показана на рис. 7, кривая 3, и аппроксимирована выражением:

$$\Lambda_p = 0,50 \Lambda_{\text{exp}} 1,17 K \quad (19)$$

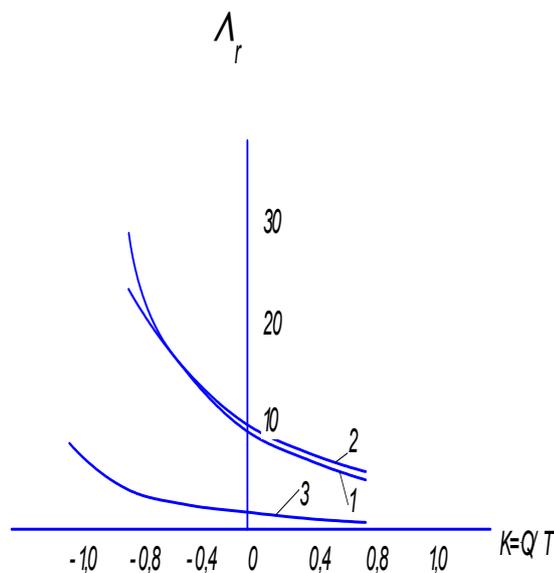


Рис. 7. Диаграммы пластичности:

1 – НТ-50 без деформации; 2 – медь марки МВ; 3 – сплав НТ-50 после многократного волочения.

Заключение

1. Для компонентов сверхпроводящей гальванической шины с ростом интенсивности деформации увеличивается интенсивность касательных напряжений.
2. Корреляция между интенсивностью касательных напряжений сдвига, интенсивностью деформаций и микротвердости выражена сильно ( $r = 0,9$ ).
3. Следовательно, для сплава НТ-50, меди марки МВ и гальванической меди напряженно-деформированное состояние при комнатной температуре можно определять по значению их микротвердости.
4. В результате исследований механических свойств сверхпроводящей шины установлено, что для сплава НТ-50, меди марки МВ и гальванической меди при решении теоретических задач можно использовать модель жесткопластической среды.
5. Полученные результаты можно использовать для определения энергосиловых параметров прокатки и определения условия прокатки без разрушения

**Литература**

1. Шабашов А.А., Залазинский А. Г. Определение оптимальных режимов калибровки прокаткой композитной электротехнической шины // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2008. №7. С. 46-49.

2. Матусевич В.Ф.. Композиционные материалы на металлической основе. М.: Наука и техника, 1978. 216 с.
3. Григорович В.К. В кн. Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука, 1974. 21-28. с.
4. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity.//Oxford: Pergamon Press, 1975. 420 p.
5. Beran M., McCoy J.//Quart. Appl. Mater. 1970.V.28.245p.
6. Захаров Ю.А., Ремзин Е.В., Мусатов Г.А. Основные дефекты корпусных деталей автомобилей и способы их устранения, применяемые в авторемонтном производстве // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2584/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2584/).
7. Бурцева О. А., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Нефедов В.В., Черпаков А.В. Моделирование напряженного состояния арматурных стержней, применяемых при производстве преднапряженных железобетонных конструкций // «Инженерный вестник Дона», 2011, №4 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/549/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/549/).
8. Гиндин И.А., Сомов А.И. 3. Исследование напряженно-деформированного состояния композиции медь молибден методом микротвердости // Проблемы прочности, 1972, №9. С. 56-59.
9. Колмолгов В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1976. 229 с.
10. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформация и усилия при обработке металлов давлением. М.: Машгиз, 1959. 303 с.
11. Гайнцев Г. А., Залазинский А.Г., Ляшков В.Б., Проневич В.Б. Номограммы для определения допустимых вытяжек при волочении многожильного композиционного провода // Сб. Обработка металлов давлением №4 . Свердловск: УПИ им. С.М.Кирова, 1977. С. 71-74.

12. Залазинский А.Г. Математическое моделирование процессов обработки давлением структурно-неоднородных материалов. . Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 600 с.

### References

1. Shabashov A.A., Zalazinskij A. G. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii 2008. №7. p. 46-49.
2. Matusevich V.F. Kompozicionnye materialy na metallicheskoj osnove [Composite materials with a metal base]. M.: Nauka i tehnika, 1978. 216 p.
3. Grigorovich V.K. V kn. Novoe v oblasti ispytanij na mikrotverdest [The physical basis of microhardness]. M. Nauka, 1974. 21-28. p.
4. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity. Oxford: Pergamon Press, 1975. 420 p.
5. Beran M., McCoy J. Quart. Appl. Mater. 1970. V.28. p. 245.
6. Zaharov Ju.A., Remzin E.V., Musatov G.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2584/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2584/).
7. Burceva O. A., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Nefedov V.V., Cherpakov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №4 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/549/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/549/).
8. Gindin I.A., Somov A.I. 3. Problemy prochnosti. 1972. №9. Pp. 56-59.
9. Kolmogorov V.L. Naprjazhenija, deformacii, razrushenie [Stress, strain, fracture]. M.: Metallurgija, 1976. 229 p.
10. Tarnovskij I.Ja., Pozdeev A.A., Ganago O.A. Deformacija i usilija pri obrabotke metallov davleniem [Strain and effort in the processing of metals by pressure]. M.: Mashgiz, 1959. 303 p.
11. Gajncev G. A., Zalazinskij A.G., Ljashkov V.B., Pronevich V.B. Sb. Obrabotka metallov davleniem №4. Sverdlovsk: UPI im. S.M.Kirova, 1977. Pp. 71-74.



12. Zalazinskij A.G. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki davleniem strukturno-neodnorodnyh materialov[Mathematical modeling of forming processes of structurally inhomogeneous materials].Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1990. 600 p.