

PACS: 81.40.Ef, 61.72.Mm

В.А. Белошенко<sup>1</sup>, В.Ю. Дмитренко<sup>1</sup>, В.В. Чишко<sup>1</sup>, Н.И. Матросов<sup>1</sup>,  
В.П. Дьяконов<sup>1,2</sup>, D. Gajda<sup>3</sup>, J. Pientosa<sup>2</sup>, S. Piechota<sup>2</sup>

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МНОВОЛОКНИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА НИОБИЙ–ТИТАН

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина  
E-mail: dmitrenko\_v@ukr.net

<sup>2</sup>Institute of Physics PAS  
02-668 Warsaw, Poland

<sup>3</sup>International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures  
53-421 Wroclaw, Poland

*Исследованы функциональные свойства сверхпроводящего провода (СПП) с количеством сверхпроводящих (СП) волокон до  $211^3$  и диаметром до 64 нм. Установлены зависимости температуры сверхпроводящего перехода, величины гистерезисных потерь и плотности критического тока СПП от количества и диаметра СП-волокон. Предложена методика расчета плотности критического тока по полевым зависимостям намагниченности СПП.*

**Ключевые слова:** NbTi-сверхпроводник, пакетная гидроэкструзия, плотность критического тока, температура перехода

### Введение

Соотношение сверхпроводящего и матричного материалов в СПП, их химическая природа, количество, взаимное расположение и диаметр СП-волокон в основном определяют токнесущую способность и диссипативные свойства сверхпроводника. С целью улучшения условий стабилизации тока используются конструкции с большим количеством тонких СП-волокон, находящихся в медной оболочке.

Метод пакетной гидроэкструзии дает возможность получать многоволоконный СПП с практически неограниченным количеством СП-волокон диаметром до 5 нм [1]. Следовательно, диаметр СП-волокна может быть меньше глубины проникновения магнитного поля и сравним с длиной когерентности сверхпроводника, что позволяет ожидать некоторых особенностей в электрофизическом поведении таких композитов. В частности, уменьшение диаметра волокон в композите обеспечивает повышение плотности критиче-

ского тока и комплекса механических свойств [1]. Исследованная область размеров СП-волокон ограничена 30–160 нм. Представляет интерес расширить указанный диапазон и рассмотреть изменения электрофизических свойств СПП при переходе от макро- к микро- и наноразмерам волокон.

Целью настоящей работы является исследование влияния диаметра и количества СП-волокон в многоволоконистом сверхпроводящем композите на основе сплава NbTi на температуру перехода в сверхпроводящее состояние, плотность критического тока и величину потерь на перемагничивание.

### Материалы и методы исследований

Объектами исследований служили СПП пяти конструкций: биметаллическая проволока и многоволоконистый провод с количеством волокон  $n_f = 211, 211^2, 55 \cdot 211^2, 211^3$  из сплава Nb + 50 wt% Ti (HT50) в медной (M0б) матрице.

Конструкции композита позволили получить в проволочных образцах широкий спектр диаметров и числа волокон с варьированием их объемного содержания (таблица). В основу образцов положен биметаллический конструктивный элемент из сплава HT50 в медной матрице (рис. 1). На этапе первой сборки 211 деформированных конструктивных биметаллических элементов размещали в медной оболочке. При второй сборке 211 деформированных элементов первой сборки размещали в идентичной матричной оболочке, создавая тем самым волоконистый композит с  $211 \times 211 = 211^2$  волокнами. Композиты, содержащие  $55 \times 211 \times 211 = 55 \cdot 211^2$  и  $211 \times 211 \times 211 = 211^3$

Таблица

Характеристики исследуемых образцов

Диаметр образца $D_s$ , мм	Количество СП-волокон $n_f$	Диаметр СП-волокон $d_f$ , $\mu\text{m}$	Объем образца $V$ , $10^{-3} \text{ cm}^3$	Коэффициент заполнения по сплаву $K$
3	1	2120	35	0.5
	211	120		0.34
	$211^2$	6.7		0.225
	$55 \cdot 211^2$	0.7		0.133
	$211^3$	0.385		0.095
1	1	700	4	0.5
	211	40		0.34
	$211^2$	2.25		0.225
	$55 \cdot 211^2$	0.233		0.133
	$211^3$	0.128		0.095
0.5	1	350	1	0.5
	211	20		0.34
	$211^2$	1.12		0.225
	$55 \cdot 211^2$	0.116		0.133
	$211^3$	0.064		0.095

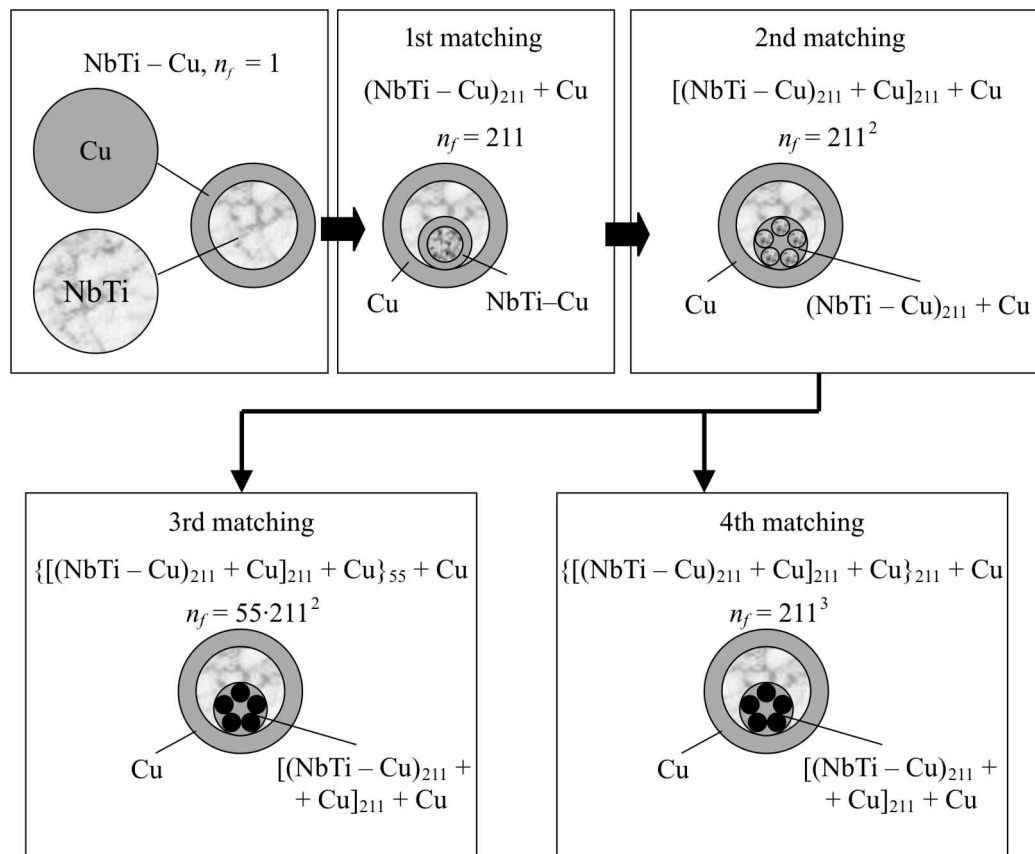


Рис. 1. Схема получения многоволоконного СПП

ниобий-титановых волокон, получали повторением указанной операции с конструктивными элементами второй сборки. Формоизменение сборок и прутковых заготовок осуществляли методом гидроэкструзии, проволочных заготовок – традиционным волочением.

Намагниченность измеряли вибрационным магнитометром VSM-4500 на образцах цилиндрической формы при температуре 5 К в магнитных полях до 12 Т, перпендикулярных оси образцов.

Температуру перехода в сверхпроводящее состояние оценивали из температурных зависимостей намагниченности исследуемого образца. Точность измерения  $T_C$  – 0.05 К.

Критический ток образцов измеряли четырехзондовым резистивным методом при температуре 4.2 К в поперечном внешнем магнитном поле до 12 Т (критерий – 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ ). Величину плотности критического тока  $J_c$  рассчитывали по формуле

$$J_c = \frac{I_c}{S},$$

где  $I_c$  – критический ток,  $S$  – площадь сверхпроводника.

Расчет плотности критического тока по экспериментальным полевым зависимостям намагниченности выполняли по рекомендациям, изложенным в

работах [2–5]. Оценку гистерезисных потерь производили по площади петли гистерезиса [6].

Все измерения осуществляли на образцах, находящихся в деформированном состоянии.

### Результаты и их обсуждение

Формула для расчета плотности критического тока по намагниченности для СПП с цилиндрическими волокнами имеет вид [4]:

$$J_c = K \frac{\Delta M}{\mu_0 d_f}, \quad (1)$$

где  $\Delta M = M_B/2$  – полуширина гистерезисной петли, соответствующей магнитному полю  $H$ ;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $d_f$  – диаметр СП-волокон;  $K$  – коэффициент, по различным данным принимающий значения от 3 до 30.

Полевые зависимости намагниченности СПП исследуемых конструкций диаметром 0.5 mm приведены на рис. 2. Использование известных математических моделей расчета плотности критического тока по полевым зависимостям

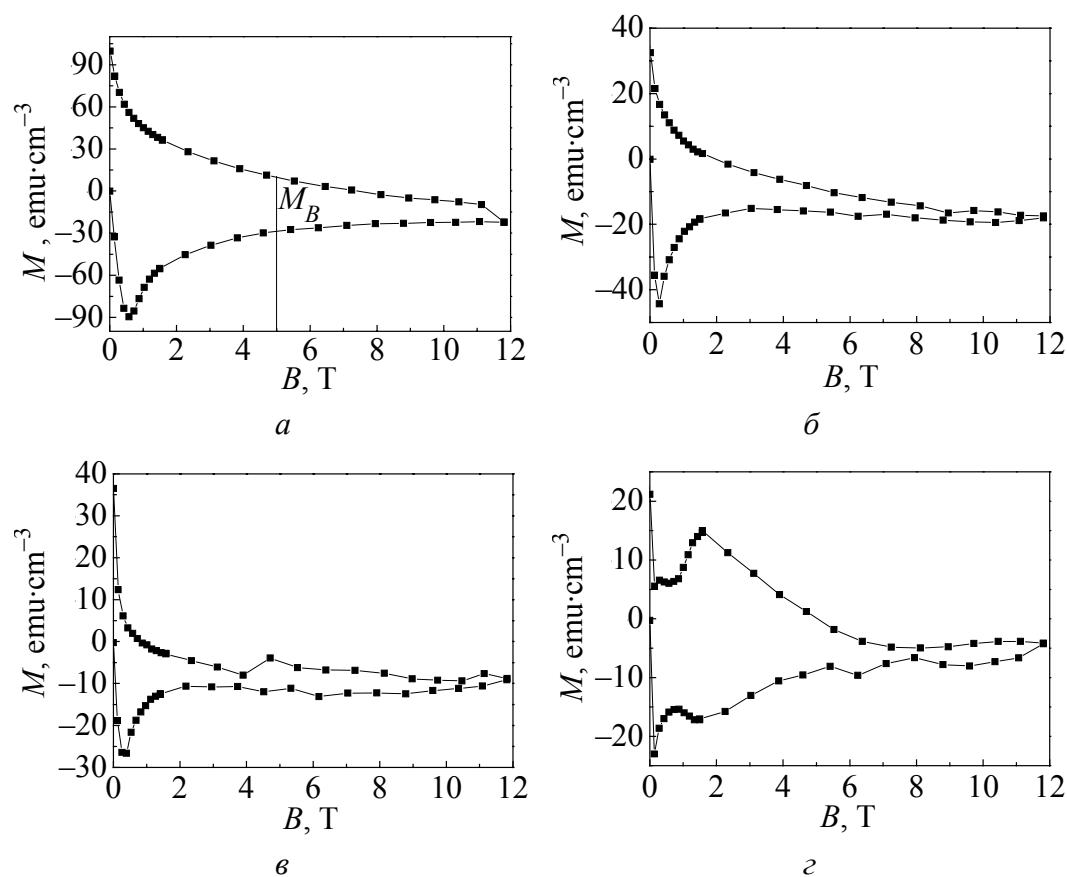
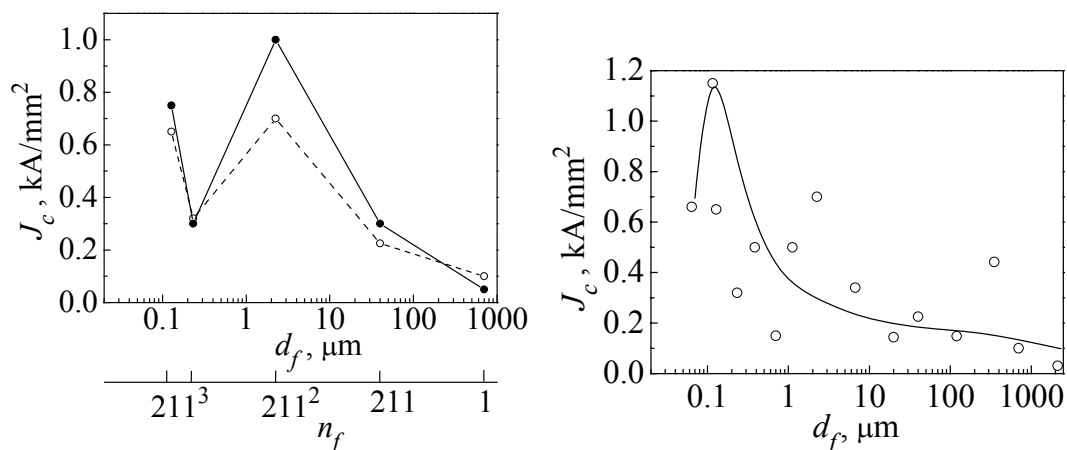


Рис. 2. Зависимости намагниченности многоволоконистого СПП от индукции магнитного поля: а –  $n_f = 1$ , б – 211, в –  $211^2$ , г –  $211^3$

намагниченности [2–5] не позволяет получить достоверную информацию о транспортных свойствах многоволоконистых СПП с количеством волокон  $n_f > 200$ . Так, например, при  $n_f > 211^2$  расчетная плотность критического тока превышает теоретически возможную для NbTi-сверхпроводников на порядок. Требуется уточнения, учитывающие размер СП-волокон.

Сравнение экспериментальных значений плотности критического тока и рассчитанных по формуле (1) дало возможность установить эмпирический коэффициент  $K$ , позволяющий получить достаточно близкую сходимость кривых (рис. 3). В результате найдены следующие значения  $K$  в зависимости от размера СП-волокон: при  $d_f > 100 \mu\text{m}$   $K = 0.1$ ;  $1 \mu\text{m} < d_f < 100 \mu\text{m}$   $K = 1$ ;  $d_f < 1 \mu\text{m}$   $K = 80$ .

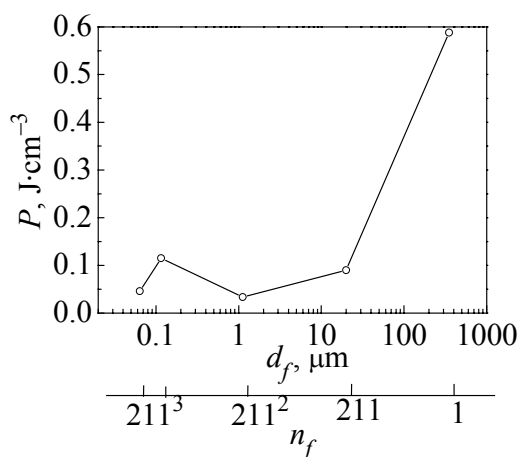
Разработанная методика, основанная на магнитных измерениях, может служить способом ориентировочной оценки транспортных свойств многоволоконистых СПП в широком диапазоне характеристик их дисперсности. Зависимости расчетных значений  $J_c$  от размера СП-волокон представлены на рис. 4. С уменьшением размера волокон до  $10 \mu\text{m}$  плотность критического тока изменяется незначительно, а затем резко увеличивается, достигая максимального значения при  $d_f \approx 120 \text{ nm}$ . При дальнейшем уменьшении размера волокон  $J_c$  снижается, что связано, вероятно, с эффектом близости.



**Рис. 3.** Расчетная (---○---) и экспериментальная (—●—) зависимости плотности критического тока многоволоконистого СПП от диаметра волокон (магнитное поле 5 Т,  $D_s = 1 \text{ mm}$ )

**Рис. 4.** Расчетная зависимость плотности критического тока многоволоконистого СПП от диаметра волокон (магнитное поле 5 Т)

Для многоволоконистых СПП исследуемых пяти конструкций диаметром  $0.5 \text{ mm}$  произведена оценка гистерезисных потерь в зависимости от диаметра и количества СП-волокон (рис. 5). Эта зависимость имеет немонотонный характер с минимумом, соответствующим  $n_f = 211^2$  и  $d_f = 1.12 \mu\text{m}$ . При этом величина потерь в 17.5 раз меньше таковых, присущих биметаллическому сверхпроводнику. Следует отметить, что для СПП более высокой дисперсности ( $n_f =$

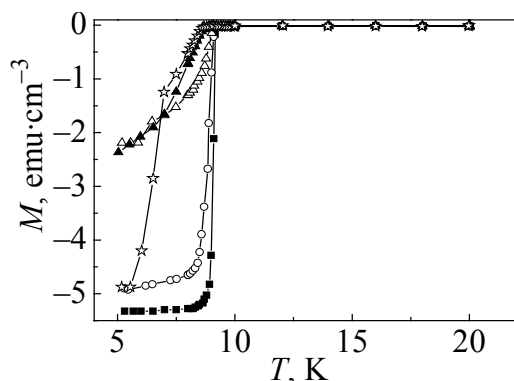


**Рис. 5.** Зависимость гистерезисных потерь в многоволокнутом СПП от диаметра СП-волокон

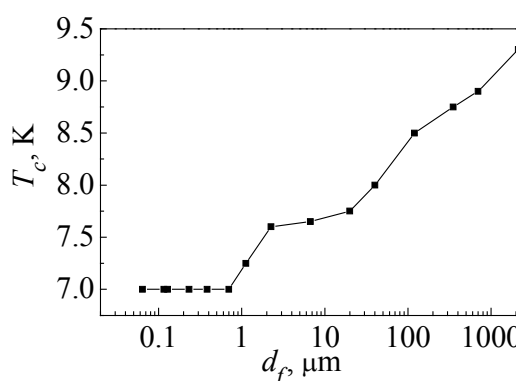
сверхпроводящего перехода могут вносить вклад образование интерметаллических соединений на границах волокон и увеличение содержания меди с ростом числа волокон [7].

$211^3$ ,  $d_f = 64$  nm) потери на перематничивание лишь в 1.35 раза превышают минимальные, однако проводам такой конструкции присущи более высокие транспортные свойства.

Температурные зависимости намагниченности (рис. 6) образцов диаметром  $D_s = 1$  mm с различным размером СП-волокон отличаются существенным образом. Переход в сверхпроводящее состояние меняется от резкого, соответствующего СПП с  $n_f = 1$  и  $n_f = 211$  волокон, к размытому, соответствующему СПП с  $n_f = 211^2$ ,  $55 \cdot 211^2$ ,  $211^3$ . В характер



**Рис. 6.** Зависимости намагниченности многоволокнутого СПП от температуры: —■—  $n_f = 1$ , —○—  $211$ , —△—  $211^2$ , —▲—  $55 \cdot 211^2$ , —☆—  $211^3$ ;  $D_s = 1$  mm



**Рис. 7.** Зависимости температуры перехода в сверхпроводящее состояние многоволокнутого СПП от диаметра волокон

С уменьшением диаметра СП-волокон от 2 mm до 1 μm температура перехода в сверхпроводящее состояние монотонно снижается от 9 до 7 K (рис. 7) вследствие влияния эффекта близости [8,9]. Дальнейшее уменьшение размера СП-волокон не приводит к изменениям температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

### Выводы

Предложена методика оценки транспортных свойств сверхпроводников с количеством волокон до  $211^3$  по полевым зависимостям намагниченности и

определены коэффициенты для расчета плотности критического тока проводов данной конструкции, позволяющие получить достаточно близкую сходимость расчетных и экспериментальных значений.

Установлено, что наиболее высокий уровень транспортных свойств наблюдается в сверхпроводнике с  $n_f = 211^3$ ,  $d_f = 120$  nm.

Показано, что с уменьшением размера волокна температура перехода в сверхпроводящее состояние монотонно снижается от 9 до 7 К.

Работа была выполнена при частичной поддержке Minister Nauki и Szkolnictwa Wyzszego (Poland) (проект NN 508392035).

1. В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, Н.И. Матросов, Э.А. Медведская, Гидропрессование волокнистых композиционных материалов, Наукова думка, Киев (2009).
2. M.N. Wilson, Cryogenics **13**, 361 (1973).
3. S. Le Naour, L. Oberli, R. Wolf, R. Puzniak, A. Szewczyk, A. Wisniewski, H. Fikis, M. Foitl, and H. Kirchmayr, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**, 1763 (1999).
4. Ю.П. Агапов, В.Г. Дроженко, В.И. Дудин, В.Н. Михайлов, ФНТ **1**, 428 (1975).
5. Г.К. Зеленский, В.Я. Филькин, А.П. Голубь, ВАНТ. Серия «Атомное материаловедение» вып. 1(15), 9 (1989).
6. Г. Брехна, Сверхпроводящие магнитные системы, Мир, Москва (1976).
7. В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники» № 5, 33 (2000).
8. I. Hlasnik, S. Takacs, V.P. Buryak, Cryogenics **25**, 558 (1985).
9. E.W. Collings, T.S. Kreilick, E. Gregory, P.I. Lee, J.C. Ho, Adv. Cryog. Eng. Mater. **34**, 1027 (1988).

В.О. Білошенко, В.Ю. Дмитренко, В.В. Чижко, М.І. Матросов, В.П. Дьяконов, D. Gajda, J. Pientosa, S. Piechota

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОВОЛОКНИСТИХ НАДПРОВІДНИКІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ НІОБІЙ–ТИТАН

Досліджено функціональні властивості надпровідного дроту з кількістю надпровідних волокон до  $211^3$  і діаметром до 64 nm. Встановлено залежності температури надпровідного переходу, величини гістерезисних втрат і густини критичного струму надпровідного дроту від кількості й діаметра надпровідних волокон. Запропоновано методику розрахунку густини критичного струму за польовими залежностями намагніченості надпровідника.

**Ключові слова:** NbTi-надпровідник, пакетна гідроекструзія, густина критичного струму, температура переходу

*V.A. Beloshenko, V.Yu. Dmitrenko, V.V. Chishko, N.I. Matrosov, V.P. Dyakonov,  
D. Gajda, J. Pientosa, S. Piechota*

## FUNCTIONAL PROPERTIES OF MULTIFIBRE SUPERCONDUCTORS BASED ON NIOBIUM–TITANIUM ALLOY

Functional properties of superconducting wire (SCW) with superconducting (SC) fibres up to  $211^3$  pieces of 64 nm diameter have been investigated. Dependences of superconducting transition temperature, value of hysteresis losses and SCW critical current density on quantity and diameter of SC fibres have been determined. A procedure is proposed to calculate the critical current density by the field dependences of SCW magnetization.

**Keywords:** NbTi-semiconductor, packet hydroextrusion, critical current density, transition temperature

**Fig. 1.** Diagram of multifibre SCW making

**Fig. 2.** Dependences of multifibre SCW magnetization on magnetic field induction:  $a - n_f = 1$ ,  $b - 211$ ,  $c - 211^2$ ,  $d - 211^3$

**Fig. 3.** Calculated (---○---) and experimental (---●---) dependences of the critical current density for multifibre SCW on fibre diameter (magnetic field 5 T,  $D_s = 1$  mm)

**Fig. 4.** Calculated dependence of the critical current density for multifibre SCW on fibre diameter (magnetic field 5 T)

**Fig. 5.** Dependence of hysteresis losses in multifibre SCW on SC fibre diameter

**Fig. 6.** Temperature dependences of multifibre SCW magnetization:  $-\blacksquare-$  –  $n_f = 1$ ,  $-\circ-$  –  $211$ ,  $-\triangle-$  –  $211^2$ ,  $-\blacktriangle-$  –  $55 \cdot 211^2$ ,  $-\star-$  –  $211^3$ ;  $D_s = 1$  mm

**Fig. 7.** Dependences of superconducting transition temperature for multifibre SCW on fibre diameter