

УДК 621.396.677

А. И. Оборина, И. В. Трифанов, Б. Н. Исмаилов, И. В. Стерехов

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ ВОЛНОВОДОВ КВЧ-ДИАПАЗОНА

*Показаны результаты исследований технологических параметров при изготовлении труб волноводов из сплава 32НКД методом дорнования.*

*Ключевые слова: волновод, инструмент-дорн, величина обжатия, усадка, шероховатость поверхности.*

Волновод – это искусственный или естественный канал, способный поддерживать распространяющиеся вдоль него волны, поля которых сосредоточены внутри канала или в примыкающей к нему области. В канале волновода обеспечивается полная экранировка электромагнитного поля. Энергия передается электромагнитным полем, находящимся между проводниками, а не током, текущим по самим проводникам. Роль проводников при этом сводится к роли устройств, направляющих электромагнитную энергию. В СВЧ-КВЧ диапазонах металлические волноводы имеют неоспоримые преимущества перед другими линиями передач.

Достоинства волноводов следующие:

– волновод обладает наибольшей простотой и жесткостью конструкции;

– волновод не имеет потерь на излучение, так как электромагнитное поле целиком заключено внутри трубы, если толщина стенок превышает глубину проникновения поля в металл,;

– потери в стенках волновода должны быть меньше, чем в проводниках обычных линий, например коаксиальных;

– пробивная прочность волновода выше, чем у коаксиальной или двухпроводной линии при максимальной напряженности электрического поля.

Основными недостатками волноводов СВЧ-диапазона являются большие масса и габариты, трудности сопряжения с активными полупроводниковыми приборами, а также узкополосность. Ширина полосы составляет около 40 % средней частоты. Ограничения связаны с сильной дисперсией и возникновением условий для распространения других типов колебаний при высоких частотах.

В связи с освоением миллиметрового диапазона волн большое внимание уделяется разработке технологии изготовления волноводов КВЧ-диапазона круглого и прямоугольного сечения. Волноводы КВЧ-диапазона имеют меньшие габаритомассовые характеристики и поперечные размеры каналов, по сравнению с волноводами СВЧ-диапазона. К ним предъявляются более высокие требования по обеспечению точности канала 0,01 мм, снижению шероховатости рабочей поверхности  $R_a$  0,16–0,2 мкм, повышению характеристик токопроводящего скин-слоя, которые являются частотнозависимыми, а также к температурной стабильности размеров (температурный коэф-

фициент линейного расширения ТКЛР  $(1...2) \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$  должен быть минимальным).

Использование сплава 32НКД с низким ТКЛР для изготовления волноводов КВЧ-диапазона является актуальным. При изготовлении труб волноводов КВЧ – диапазона круглого сечения методом дорнования возникает некоторые технологические проблемы, которые взаимосвязаны и влияют на качество выпускаемых изделий (рис. 1) [1].

Качество труб волноводов может быть оценено точно и шероховатостью канала волновода, а также низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР  $(1...2) \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ).

Из причинно-следственной диаграммы следует, что при изготовлении труб волноводов круглого сечения из сплава 32НКД конструкция инструмента-дорна, его геометрические и прочностные характеристики оказывают большое влияние на точность, шероховатость поверхности канала и температурный коэффициент линейного расширения. На температурный коэффициент линейного расширения труб волноводов из сплава 32НКД также существенно влияют степень деформации, режимы межоперационной термообработки и микроструктура после проведения дорнования и межоперационного отжига для снятия напряжений и стабилизации микроструктуры. Степень деформации определяется величиной обжатия заготовки трубы волновода, усилием протягивания, а также конструкцией инструмента-дорна и его геометрическими и прочностными характеристиками.

На точность канала трубы волновода большое влияние оказывают величины обжатия трубы-заготовки и усадки канала волновода (рис. 2) [1].

Ширина контакта рабочего конуса инструмента-дорна с заготовкой  $L_\phi$  из-за изгиба ее стенок оказывается существенно меньше геометрической ширины  $L_r$ . Геометрическую ширину вычисляют по формуле

$$L_r = a/2\sin\alpha, \quad (1)$$

где  $a$  – обжатие зубом,  $\alpha$  – угол рабочего конуса инструмента.

Для обеспечения требуемого качества рабочей поверхности каналов труб волноводов необходимо обеспечить определенный уровень контактных давлений в зоне деформирования со стороны инструмента-дорна. Контактные давления исследовали для той же номенклатуры труб, что и при исследовании усилий дорнования.

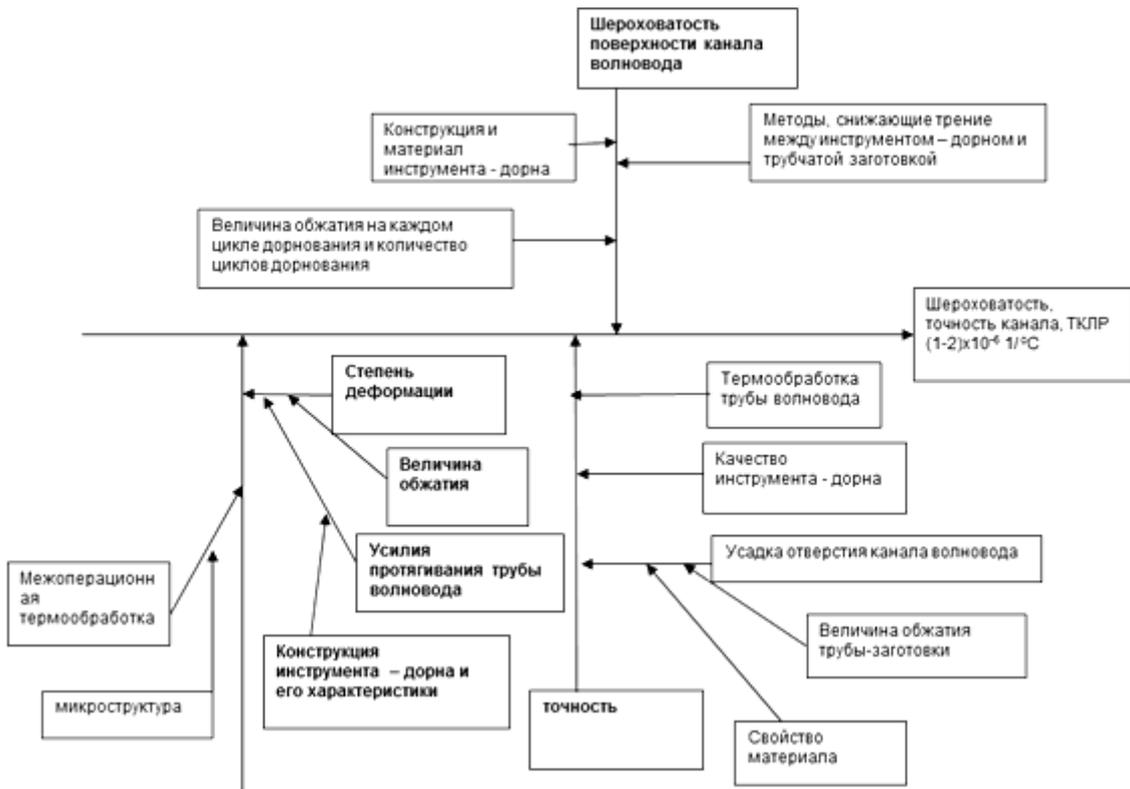


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма процесса изготовления и обеспечения качества труб волноводов

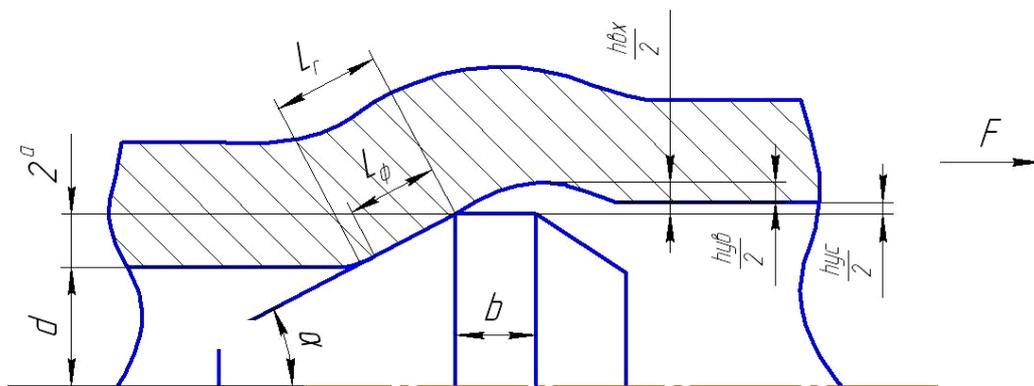


Рис. 2. Схема взаимодействия инструмента-дорна с трубчатой заготовкой

Средние контактные давления на рабочем конусе находят по следующей формуле [2]:

$$P = \frac{F}{\pi d_c L_\phi (\sin \alpha + f \cos \alpha)}, \quad (2)$$

где  $F$  – усилие дорнования;  $d_c$  – диаметр рабочего конуса посреди ширины контакта;  $L_\phi$  – фактическая ширина контакта рабочего конуса инструмента-дорна;  $\alpha$  – половина угла рабочего конуса инструмента-дорна;  $f$  – коэффициент трения между инструментом-дорном и трубчатой заготовкой.

Правомерность приравнивания усилия дорнования к усилию на рабочем конусе подтверждается результатами измерения усилия дорнования в зависимости

от ширины  $b$  (рис. 2) цилиндрической ленточки инструмента – дорна. В работе [1] показано, что влияние ширины ленточки  $b$  на усилие дорнования  $F$  является слабым. Поэтому силами трения на ленточке при  $b \leq 3$  мм (рис. 2) можно пренебречь, приняв действующие на рабочем конусе усилие, равным усилию дорнования. При  $D/d \leq 3$  для тонкостенных труб волноводов заготовка в процессе дорнования может подвергаться сквозной пластической деформации. Материал заготовки в контактном слое находится в условиях, близких к объемному сжатию. В остальной части заготовки напряженно-деформированное состояние приближается к состоянию трубы, подвергнутой воздействию равномерного внутреннего давления.

При дорновании средние контактные давления определяются величиной обжатия ( $a$ ) (рис. 2), механическими свойствами материала заготовок и практически не зависят от диаметра канала трубы волновода. При малых обжатиях контактные давления могут достигать (6...9)  $\delta_T$  предела текучести материала заготовки [1]. Для снижения шероховатости рабочей поверхности трубы волновода до требуемых параметров этого вполне достаточно. С увеличением обжатия контактные давления падают, а в области малых обжатий интенсивно возрастают. Это объясняется тем, что с повышением обжатия фактическая ширина контакта рабочего конуса инструмента-дорна с заготовкой растет быстрее, чем усилие дорнования  $F$  (рис. 3) [2].

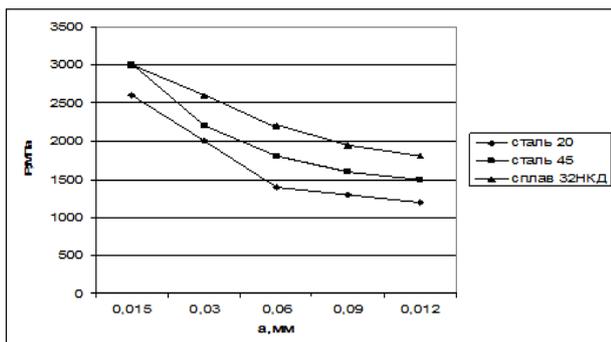


Рис. 3. Зависимость средних контактных давлений от обжатия ( $a$ ) при дорновании отверстия

Эти зависимости носят нелинейный характер и показывают, что наибольшие средние контактные давления наблюдаются в области  $a = 0,012-0,015$  мм. Для всех марок сталей эти наибольшие контактные давления при малых обжатиях используют на финишных операциях при изготовлении каналов малого сечения для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности. Важным технологическим параметром для повышения качества труб волноводов являются усилия дорнования  $F$  (рис. 4).

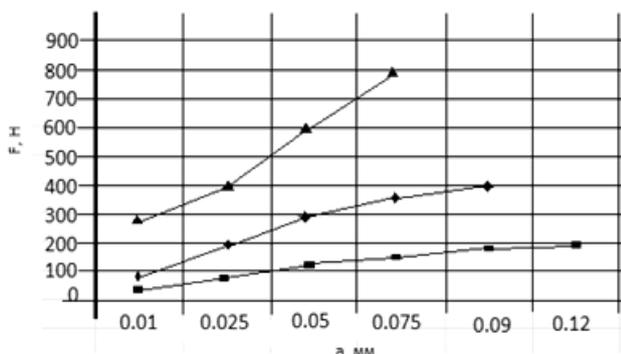


Рис. 4. Зависимость усилия дорнования каналов твердосплавным инструментом:  
1 – медь М1,  $\varnothing = 3$  мм; 2 – медь М1,  $\varnothing = 1,4$  мм;  
3 – сплав 32 НКД,  $\varnothing = 3,4$  мм

Полученные результаты показывают, что усилия дорнования при выбранных параметрах обжатия и

толщины стенки трубчатой заготовки позволяют обрабатывать тонкостенные трубчатые заготовки с толщиной стенки  $h = 0,5-1,4$  мм.

Усилия дорнования необходимо использовать для оценки прочности хвостовика инструмента-дорна, расчета инструмента-дорна, непосредственно трубчатой заготовки, подбора вида смазки, а также контактных давлений и других параметров. На основе экспериментальных исследований была получена зависимость для расчета усилий дорнования:

$$F = c \text{НВ} d^x a^y = 1,235 d^{0,57} a^{1,345} \text{НВ}, \quad (3)$$

где  $c$  – коэффициент; НВ – твердость материала;  $d$  – диаметр канала трубчатой заготовки;  $a$  – величина обжатия трубчатой заготовки.

Согласно формуле 3, следует, что наибольшее влияние на увеличение  $F$  оказывают твердость материала обрабатываемой трубчатой заготовки и величина обжатия.

Дорнование труб волноводов может сопровождаться как положительной, так и отрицательной усадкой (разбивкой) отверстия ( $h_{yc}$ ) [1] в зависимости от соотношения между неконтактной деформацией  $h_{вк}$  за рабочим конусом инструмента-дорна и упругим восстановлением материала заготовки  $h_{ув}$ .

При  $D/d < 3$  дорнование отверстий может проводиться с большим обжатием, например, обработка заготовок из горячекатаных и холодно-деформированных труб  $D/d = 1,2-1,6$  может производиться с суммарным обжатием  $a = (0,1-0,2)d$  и сопровождаться значительным изменением размеров заготовок. Точность диаметра отверстия канала может быть повышена в несколько раз (с 16–17 до 8–11 квалитетов) [1]. При высоких требованиях к точности отверстия труб волноводов (JТ6-JТ7) необходима их предварительная обработка резанием, например, расточка, зенкерование или развертывание. При реализации данного метода половина угла рабочего конуса инструмента-дорна  $\alpha$  может составлять 5–6°, коэффициент трения  $f = 0,2-0,3$ , шероховатость рабочей поверхности  $R_a \leq 0,03$  мкм. При таких параметрах дорнование тонкостенных трубчатых заготовок целесообразно проводить путем их осевого растяжения за счет усилия дорнования  $F$  и протягивания самой заготовки относительно инструмента-дорна, неподвижно закрепленного в станке. Такая технологическая схема в сочетании с применением специальных установочных приспособлений позволяет обеспечить надежное базирование заготовки, снизить до минимума перекосы и изгиб хвостовика инструмента-дорна, закрепленного неподвижно.

Для изготовления каналов малого сечения требуется обеспечить высокую точность  $\pm 0,01$  мм и шероховатость  $R_a 0,2...0,16$  мкм [1]. Одним из эффективных методов обеспечения требуемого качества является выбор параметров дорнования  $a$ ,  $F$ ,  $\alpha$ ,  $f$ . Величина усадки отверстия  $H$  при дорновании от зависит от величины обжатия заготовки  $a$  и отношения  $\delta_{02}/E$ , где  $\delta_{02}$  – предел текучести материала заготовки;  $E$  – модуль упругости. Чем больше  $\delta_{02}/E$ , тем больше усадка, что подтверждают полученные экспериментальные

зависимости. Кроме того, на усадку влияет величина обжатия и диаметр труб волновода:

$$H = f(\alpha, \delta_{02}/E, d), \quad (4)$$

где  $H$  – величина усадки,  $\alpha$  – величина обжатия заготовки,  $d$  – диаметр заготовки.

Величину усадки необходимо учитывать при назначении допусков на диаметры отверстий высокоточных труб волноводов круглого сечения. По экспериментальным данным была получена зависимость усадки  $H$  от параметров  $\delta_{02}/E$ ,  $d$ ,  $\alpha$  в качестве регрессионной модели принято следующее соотношение:

$$H = b_0 + b_1d + b_2(\delta_{02}/E) + b_3\alpha + b_4d^n + b_5d(\delta_{02}/E) + b_6da + b_7(\delta_{02}/E)^2 + b_8(\delta_{02}/E)\alpha + b_9\alpha^2. \quad (5)$$

После применения пакета статистического анализа, результаты которого представлены в табл. 1–3, определены по величинам критерия Стьюдента и равенству знаков последних двух столбцов табл. 3 значимые члены – в формуле (5), и получена величина усадки в натуральных значениях факторов:

$$H = 2d^2 + 4,308(\delta_{02}/E)^2 - 0,091\alpha^2. \quad (6)$$

На величину усадки труб волноводов, изготавливаемых из сплава 32НЖД, наибольшее влияние оказывают свойства материала – отношение предела прочности к модулю упругости  $\delta_{02}/E$ .

На основании проведенных исследований можно сделать вывод: механика пластического деформирования в процессе деформирующего протягивания труб волноводов должна строиться по определенной технологической схеме. Дорнование каналов труб необходимо осуществлять за несколько переходов инструментами-дорнами с возрастающими диаметрами. При первом протягивании целесообразно использовать 30–40 % суммарного обжатия при дорновании, последующие переходы осуществляют с малыми обжатиями, при которых обеспечивается высокий уровень контактных давлений, что позволит получить высокое качество поверхности (низкую шероховатость и отсутствие трещин), а также требуемую точность канала. После трех циклов дорнования рекомендуется обжигать заготовки в среде аргона при температуре 800 °С. При обжатии на финишных операциях  $\alpha = 0,05–0,01$ ;  $R_a$  поверхности трубы волновода снижается на несколько порядков: от исходного  $R_a$  1,8 до  $R_a$  0,08 для сплава 32НЖД после четырех циклов дорнования, а точность достигает JT7, ТКЛР  $(1...2) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

#### Библиографические ссылки

1. Скворцов В. Ф., Арляков А. Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра : моногр. Томск : Изд-во ТПУ, 2005.
2. Исследование параметров взаимодействия инструмента-дорна и заготовки при изготовлении каналов малого сечения / И. В. Трифанов [и др] // Вестник СибГАУ. Красноярск. 2007. Вып. 4 (17). С. 126–127.
3. Трифанов И. В., Стерехов И. В. Особенности повышения качества при изготовлении каналов волноводов малого сечения дорнованием // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. С. 205–206.

Регрессионная статистика

Множественный R	0,9890
R-квадрат	0,9781
Нормальный R -квадрат	0,7986
Стандартная ошибка	0,6037
Наблюдение	20

Таблица 1

Дисперсионный анализ

Показатель	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	9	195,06	21,67	76,46	4,9410 <sup>-8</sup>
Остаток	12	4,37	0,36	–	–
Итого	21	199,44	–	–	–

Таблица 2

Регрессионный анализ

Показатель	Коэффициент	Стандартная ошибка	Статистика	Нижнее 95 %	Верхнее 95 %
Y-пересечение	-3,943	4,163	-0,947	-13,015	5,128
d(b <sub>1</sub> )	-8,28	4,290	-1,930	-17,631	1,064
$\Delta_{02}/E(b_0)$	0	0	65535	0	0
A(b <sub>3</sub> )	1,14	0,699	1,636	-0,379	2,66
d <sup>2</sup> (b <sub>4</sub> )	2	0,917	2,179	0,00035	3,99
d $\delta_{02}/E(b_5)$	0	0	65535	0	0
da(b <sub>6</sub> )	-0,027	0,082	-0,334	-0,2078	0,152
( $\delta_{02}/E$ ) <sup>2</sup> (b <sub>7</sub> )	4,308	0,532	8,092	3,148	5,469
( $\delta_{02}/E$ )a(b <sub>8</sub> )	0,251	0,358	0,703	-0,528	1,031
a <sup>2</sup> (b <sub>9</sub> )	-0,091	0,027	-3,362	-0,150	-0,0032

Таблица 3

A. I. Oborina, I. V. Trifanov, B. N. Ismailov, I. V. Sterekhov

## TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY DURING MANUFACTURE OF PIPES OF WAVEGUIDES OF EXTREMELY-HIGH FREQUENCY BAND

*Results of researches of technological parameters during manufacture of pipes of waveguides from 32NKD alloy by method of mandreling.*

*Keywords: waveguide, tool – mandrel, value of pressing, shrinkage, surface roughness.*

© Оборина А. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., Стерехов И. В., 2012

УДК 537.6; 537.9

С. И. Попков, С. В. Семенов, А. В. Шабанов, Н. В. Волков, Н. В. Михашенок

## ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ \*

*Методом оптической зонной плавки отработаны режимы роста и синтезированы монокристаллы  $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ . Рентгеноструктурные исследования, рентген-флюоресцентный анализ, а также проведенные исследования намагниченности и сопротивления указывают на то, что получены высококачественные монокристаллы.*

*Ключевые слова: монокристалл марганита, оптическая зонная плавка.*

Замещенные оксиды марганца или манганиты  $R_{1-x}A_xMnO_3$  (R – трехвалентные редкоземельные ионы  $La^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ ,  $Sm^{3+}$  и др., А – двухвалентные ионы  $Ca^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ) до сих пор остаются предметом интенсивных исследований, поскольку данные материалы обладают богатой фазовой диаграммой и их физические свойства оказываются чувствительными к различным внешним воздействиям, таким как магнитное и электрическое поле, транспортный ток, оптическое облучение [1–6]. Это делает материалы на основе манганитов перспективными для практических применений в устройствах спинтроники. Такое многообразие свойств объясняется примесным фазовым расслоением в системах на субмикронном масштабе [5; 6], которое обычно реализуется в виде сосуществования проводящей ферромагнитной и диэлектрической фазы с локализованными носителями. Присущий манганитам эффект колоссального отрицательного магнитосопротивления объясняется увеличением доли проводящей ферромагнитной фазы под действием магнитного поля [1; 5; 6]. Основное состояние замещенных манганитов определяется такими факторами, как катионные радиусы атомов в позициях R, а также их разупорядочением [1]. Оно может быть как ферромагнитным металлическим, так и антиферромагнитным с зарядовым упорядочением, как, например, в системах  $Pr_{0,65}(Ca_xSr_{1-x})_{0,35}MnO_3$  [7] и  $La_{0,7-x}Nd_xPb_{0,3}MnO_3$  [8]. Такое изменение основного состояния в манганитах при допировании связано с конкуренцией различных взаимодействий, имеющих очень близкие значения по энергии, что позволяет

системе находиться в состоянии фазового расслоения, при котором возможно сосуществование двух фаз с различными магнитными и электронными свойствами. Именно это и позволяет легко менять свойства системы при внешних воздействиях.

Цель данной работы заключается в отработке методики выращивания высококачественных кристаллов на примере системы  $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ . Кроме того, необходимо составить характеристику на получение монокристалл.

*Синтез.* Рост кристаллов был осуществлен в печи оптической зонной плавки FZ-T-4000-H (Crystal systems, Япония). Скорость роста составляла 5 мм в час, диаметр полученного стержня ~5 мм, длина ~9 см, мощность галогенных ламп  $4 \times 1\,000$  Вт, печи FZ-T-4000-H – 72 % от максимального значения (что приблизительно соответствует температуре плавления данного состава  $t_m \sim 2200\text{--}2300$  °С). В нашем синтезе мы использовали в качестве газовой среды воздух, который продувался через зону плавления со скоростью 1 л/мин. При таком режиме стабильный монокристалл  $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$  начал стабильно расти с 6 см. Прекурсорами к поликристаллическому стержню, из которого получался монокристалл являлись следующие составы:  $MnO_2$  (99,9 % metal basis),  $CaCO_3$  (99,5 % metal basis) и  $La_2O_3$  (99,995 % metal basis), которые смешивались и перетирались до однородного состояния. Полученная смесь гидростатически прессовалась в цилиндрические стержни диаметром 5–8 мм и 50–120 мм длиной. Стержни спекались на воздухе при температуре 1450 °С в течение 10 ч.

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8365.