

EDN: STEDRT

УДК 621.745:621.746:621.791

Modeling the Process of Casting Cu–MMNCr Composite Material into a Metal Mold with Features of the Formation of Structure and Properties

Sergei L. Busygin*, **Ivan N. Dovzhenko**,
Nikolai N. Dovzhenko and **Aleksandr M. Tokmin**
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 09.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.01.2024

Abstract. The article discusses computer modeling of the processes of casting resistance welding electrodes from the Cu–MMNCr composite material (copper metal matrix reinforced with nano-sized chromium) using the specialized professional program ProCAST. During the process of pouring the melt into a metal mold, the formation of a toroidal vortex was established, which does not allow nano-sized chromium particles to float to the surface of the melt. The process of formation of the solid phase during crystallization of the alloy leading to the formation of “heat spots” (Hot Spots) at the final stage has been studied. The features of the formation of the macro- and microstructure and the elemental composition of the cast Cu–MMNCr composite material were studied. The results of the physical and mechanical properties of the cast Cu–MMNCr composite material are presented using the example of a product – a type D resistance welding electrode.

Keywords: computer modeling, chromium bronze, resistance welding electrodes, composite material, thermal unit, nano-sized particles.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FSRZ-2020–0011).

Electron microscopic studies were carried out in the laboratory of electron microscopy of the Center for Collective Use of SibFU.

The authors state that they have no conflict of interest.

Citation: Busygin S. L., Dovzhenko I. N., Dovzhenko N. N., Tokmin A. M. Modeling the process of casting Cu–MMNCr composite material into a metal mold with features of the formation of structure and properties. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(1), 108–122. EDN: STEDRT



Моделирование процесса литья композиционного материала Cu–MMNCr в металлическую форму с особенностями формирования структуры и свойств

С. Л. Бусыгин, И. Н. Довженко,
Н. Н. Довженко, А. М. Токмин
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В статье рассмотрено компьютерное моделирование процессов литья электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr (медный металлматричный с армированием наноразмерным хромом) с использованием специализированной профессиональной программы ProCAST. Установлено в процессе заливки расплава в металлическую форму образование тороидального вихря, не позволяющего наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава. Изучен процесс формирования твёрдой фазы при кристаллизации сплава, приводящий к образованию «тепловых узлов» (Hot Spots) на завершающей стадии. Исследованы особенности формирования макро– и микроструктуры и элементный состав литого композиционного материала Cu–MMNCr. Представлены результаты физико-механических свойств литого композиционного материала Cu–MMNCr на примере изделия – электрода контактной сварки типа D.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, хромистая бронза, электроды контактной сварки, композиционный материал, тепловой узел, наноразмерные частицы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020–0011).

Электронно-микроскопические исследования проведены в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования СФУ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Цитирование: Бусыгин С. Л. Моделирование процесса литья композиционного материала Cu–MMNCr в металлическую форму с особенностями формирования структуры и свойств / С. Л. Бусыгин, И. Н. Довженко, Н. Н. Довженко, А. М. Токмин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(1). С. 108–122. EDN: STEDRT

1. Введение

Процесс литья электродов контактной сварки в металлическую форму быстротечен. При заливке расплава в форму могут возникать процессы, которые невозможно наблюдать, но можно промоделировать с помощью специализированной профессиональной программы ProCAST. Программа позволяет вместе с металлургическими возможностями для всех процессов литья и литейных сплавов решать температурные, гидродинамические и деформационные задачи. В основе ProCAST лежит единый графический интерфейс Visual Environment, объединенный с генератором конечно – элементных сеток, препроцессором, базами данных, постпроцессором и двумя решателями: гидродинамическим (Flow solver) и тепловым (Thermal solver). Дополнительный функционал имеет большой список модулей, значительно расширяющий стандартные возможности программного обеспечения. В нашем случае профессиональную программу

ProCAST [1] будем использовать для численного моделирования и оптимизации процессов литья медных сплавов.

Учитывая высокую плотности меди (8920 кг/м^3) важно изучить, как будет происходить заполнение металлической формы с учётом того, что в расплаве находится 1,0 мас.% Cr. Это необходимо для понимания – будут ли наноразмерные частицы хрома в силу более низкой плотности (7190 кг/м^3) всплывать на поверхность медного расплава. А также изучить особенности формирования структуры и физико-механических свойств композиционного материала Cu–MMNCr после заливки в металлическую форму.

Учитывая эти показатели, сформулирована цель работы – исследовать методом компьютерного моделирования теплогидродинамику процесса свободной (гравитационной) заливки расплава в металлическую форму и изучить особенности формирования структуры и физико-механических свойств композиционного материала Cu–MMNCr.

2. Постановка задач для моделирования, материалы, оборудование и методика проведения экспериментов

Постановка задачи для моделирования в ProCAST включает три базовых этапа:

1. Построение расчётной сетки из CAD-модели (отливка, форма).
2. Задание материалов и параметров литейного процесса (условия заполнения, охлаждения формы, параметры расчёта).
3. Расчёт и анализ результатов моделирования.

Композиционный материал Cu–MMNCr, заливаемый в форму, соответствует сплаву С 81300—С 82800 [2] системы Cu – 1,0 % Cr (мас.%).

Материал формы сталь X12M ГОСТ 5950–2000. Металлическая форма перед заливкой расплавленного металла предварительно разогрета до $450 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Электроды контактной сварки получали литьем в металлическую форму. Остывший в металлической форме до температуры $950 \text{ }^\circ\text{C}$ электрод, соответствующий типу D ГОСТ ISO 15609–5–2020, закаливали в воде [3].

Для выполнения операции старения электроды нагревали в муфельной печи СНОЛ-1.62.5.1/11–ИЗ при температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 часов [3].

Измерения удельной электрической проводимости образцов осуществляли по ГОСТ 27333–87 на микроомметре Ф4104–М1 [3].

Из изготовленных электродов вырезали образцы для исследования механических, электропроводных свойств, макро– и микроструктуры.

Образцы подвергали тонкой шлифовке и полировке. Шлифовку проводили на абразивах разной степени дисперсности. Для окончательного выравнивания поверхности шлиф полировали до зеркального блеска, используя алмазную пасту АСМ 0,25/0 НОМ по ГОСТ 25593–83. Травление образцов для анализа микроструктуры осуществляли нанесением реактива (50 мл $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 2,5 г FeCl_3) на поверхность образца. Микроструктуру образцов исследовали на инвертированном металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer MAT. Микроструктуру образцов и элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с использованием контраста во вторичных электронах и энергодисперсионного микроанализа (EDX) [3].

Измерения твердости образцов осуществляли по ГОСТ 9013–59 на твердомере ТР 5014, по шкале твердости F, при величине испытательной нагрузки $P=588,4$ Н, диаметр шарика 1,588 мм. Измерения микротвердости образцов осуществляли по ГОСТ 9450–76 на приборе ПМТ-3 при величине испытательной нагрузки $P=0,098$ Н с интервалом между замерахми 150–200 мкм [3].

3. Результаты моделирования и проведенных экспериментов, их обсуждение

При подготовке модели производили разбивку на 2000 000 элементов (рис. 1). Форму за-полняли на 40 % объёма. Для расчёта использовали процессор Intel® Core™ i9–11900k 8 ядер, 16 МБ кэш – памяти, тактовая частота до 5,30 ГГц. Среднее время расчёта составляет 10 минут.

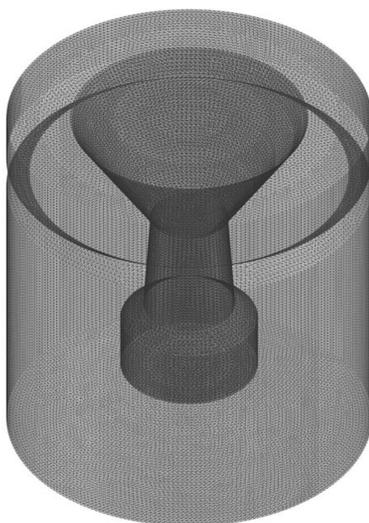


Рис. 1. Разбивка на элементы моделей электрода и металлической формы

Fig. 1. Breakdown of electrode and metal mold models into elements

3.1. Моделирование свободной (гравитационной) заливки под действием сил тяжести

На рис. 2 показано поле векторов скоростей при заполнении металлической формы свободной (гравитационной) заливкой под действием сил тяжести.

По результатам расчётов определено, что в расплавленном металле существует тороидальный вихрь с направлением течения вблизи свободной поверхности жидкости от границы формы к центру массивной части электрода с нисходящим потоком в этой области. Рассчитанное распределение скоростей по сечению тороидального вихря и модель приведены на рис. 3.

В тонком слое на поверхности дна происходит снижение скорости, и эти слои далее снижают скорости при радиальном движении расплава в сторону стенки металлической формы. Торообразный поток расплава поддерживается на всем протяжении заливки энергией основной струи.

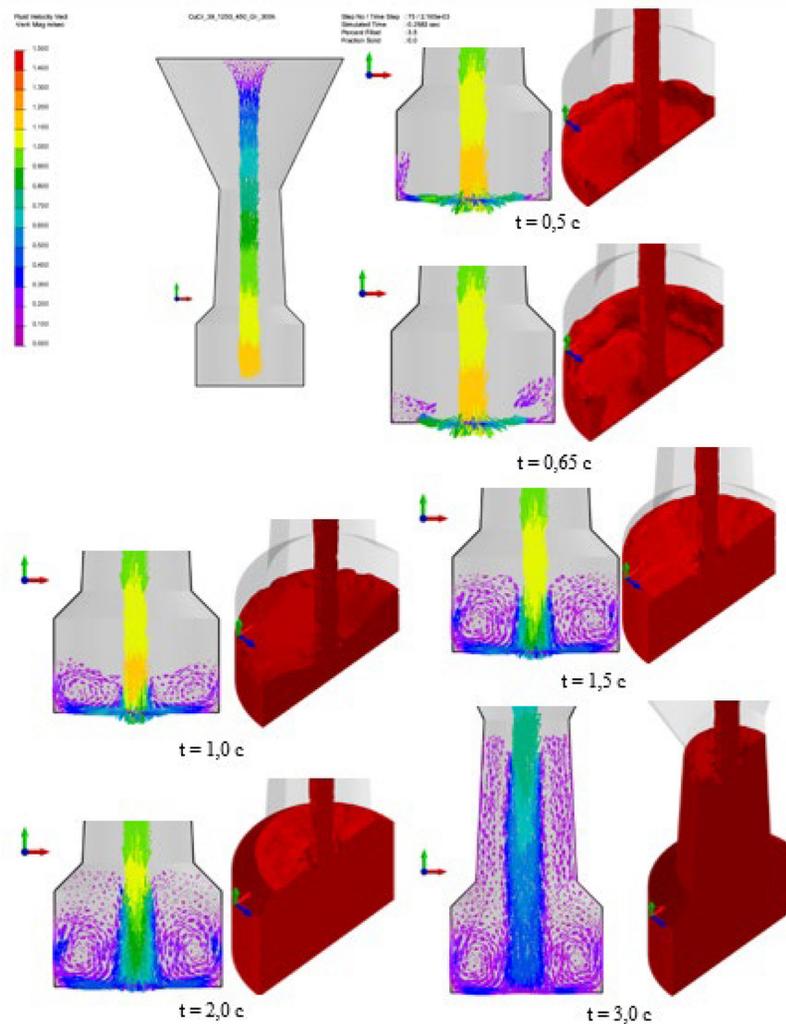


Рис. 2. Распределение векторов скоростей свободно заливаемой струи расплава при заполнении металлической формы в различные моменты времени

Fig. 2. Distribution of velocity vectors of a freely poured melt jet when filling a metal mold at different times

Исходя из свойств вихревого движения [4] следует отметить:

- 1) любая вихревая линия состоит из частиц, находящихся и перемещающихся в жидкости;
- 2) жидкая частица вращается с результирующей скоростью, которая изменяется в отношении расстояния этой частицы от рядом находящихся частиц, расположенных на оси вращения;
- 3) произведение скорости вращения на поперечное сечение в области вихревой нити состоит из частиц, находящихся в жидкости, и остается постоянным при перемещении нити;
- 4) произведение скорости вращения на поперечное сечение есть величина постоянная по всей длине одной и той же нити.

Исходя из расчётов и модели внутри однородного вихря кругового сечения, расплав вращается как «твёрдое» тело с постоянной угловой скоростью. Вне такого вихря невих-

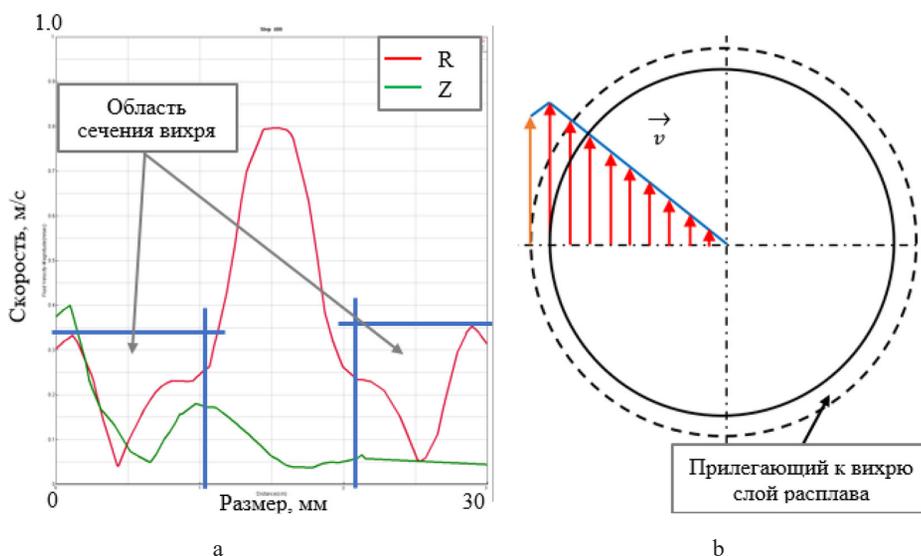


Рис. 3. Рассчитанное распределение скоростей (а) по сечению тороидального вихря вдоль радиуса R и по вертикали Z через центр сечения вихря через 2 сек и (б) модель

Fig. 3. Calculated velocity distribution (a) over the cross section of a toroidal vortex along the radius R and vertically Z through the center of the vortex section after 2 sec and (b) model

ревое движение расплава по вертикальной оси Z постепенно затухает. Такой характер гидродинамики расплава приводит к формированию вокруг частицы слоя, пресыщенного концентрацией хрома в расплаве меди, без притока свежих порций меди, что существенно замедляет и фактически останавливает процесс растворения частицы и при охлаждении приводит к выделению хрома в виде дендритов. Кроме того, не позволяет ещё не растворившимся наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава. Этот процесс прослеживается до полного заполнения металлической формы (рис. 2). Такой характер гидродинамики расплава оказывает влияние на формирование структуры и свойств композиционного материала.

3.2. Моделирование процессов формирования твёрдой фазы при кристаллизации в различные моменты времени

Процесс формирования твёрдой фазы при кристаллизации в различные моменты времени приведен на рис. 4.

Зависимость формирования объёма твёрдой фазы от времени при кристаллизации (время от начала заливки в металлическую форму) приведена на рис. 5, видно, что она является линейной от точки 20 секунд, когда начинается процесс кристаллизации.

Установленный характер кристаллизации приводит к образованию «теплового узла» (Hot Spots) на завершающей стадии [5], его видно на рис. 4. В этом случае для оценки мест образования микропористости в ProCAST можно использовать параметр Hot Spots. Характер распределения микропористости показан на рис. 6.

Моделирование показывает следующий характер изменения температур в металлической форме (рис. 7).

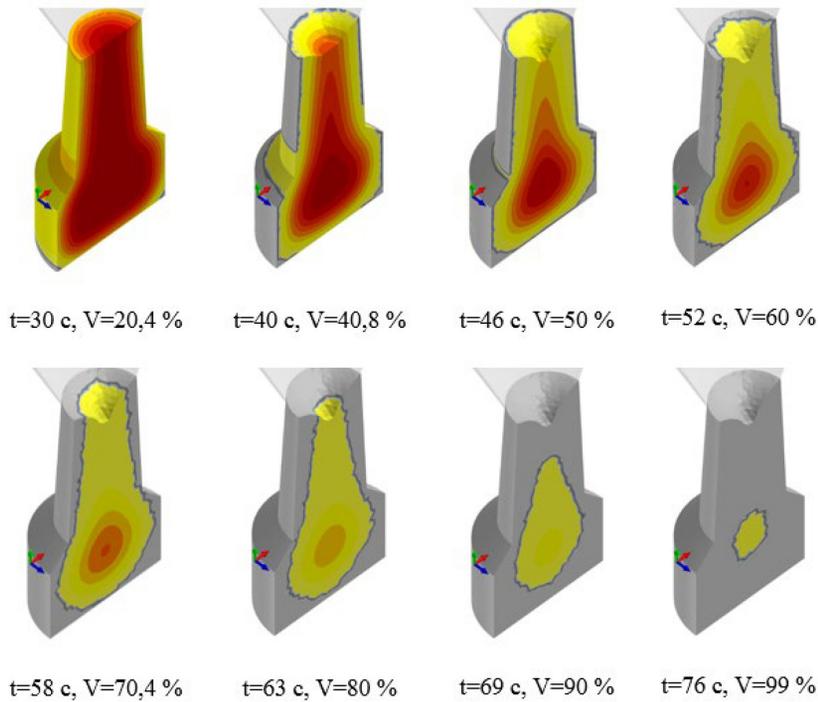


Рис. 4. Процесс формирования твёрдой фазы при кристаллизации

Fig. 4. The process of solid phase formation during crystallization

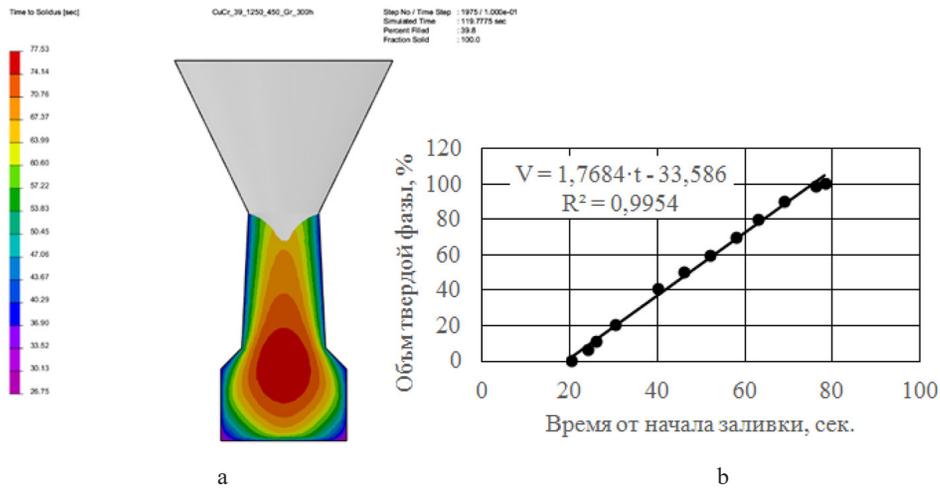


Рис. 5. Общее время кристаллизации (а) и зависимость формирования твёрдой фазы от времени при кристаллизации (б)

Fig. 5. Total crystallization time (a) and dependence of the formation of the solid phase on time during crystallization (b)

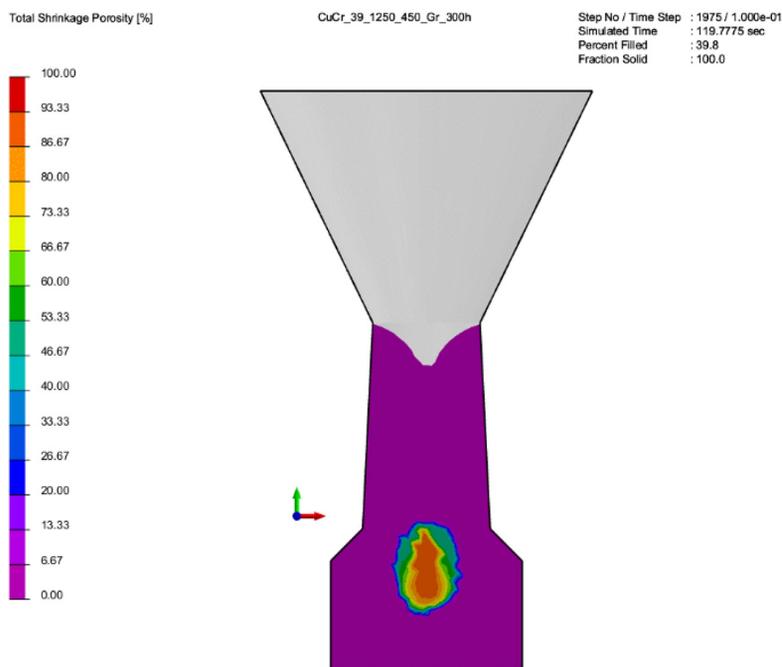


Рис. 6. Характер распределения микропористости в зоне «теплового узла»

Fig. 6. The nature of microporosity distribution in the «thermal node» zone

Участки, на которых в первую очередь идёт охлаждение, – это коническая поверхность, а также нижние и верхние углы поперечного сечения. Превалирующими являются градиенты температур вдоль конической части и от нижнего угла металлической формы.

3.3. Исследование особенностей формирования макро- и микроструктуры, элементный состав литого композиционного материала Cu–MMNCr

После литья композиционного материала без проведения операций термообработки в микроструктуре сплава можно отчетливо наблюдать нерастворившиеся наноразмерные частицы хрома, представленные на рис. 8. В нашем случае нерастворившиеся частицы хрома играют фундаментальную роль в определении конечного размера зерен в композиционном материале, поскольку они могут взаимодействовать с границами зерен, действуя как точки закрепления, замедляя или останавливая их рост [6, 7].

Установленный моделированием в ProCast характер температурных полей и кристаллизации подтверждается макроструктурой литого электрода, представленного на рис. 9. Кристаллизация сплава происходит по закономерности, характерной для определенной степени переохлаждения G .

Макроструктура литого электрода имеет три зоны с четко выраженным строением (рис. 9а). При соприкосновении жидкого металла с поверхностью металлической формы из-за большой степени переохлаждения формируется мелкозернистая зона. Следующая зона, зона столбчатых кристаллов, имеет явно выраженную ориентацию, соответствующую направлению преимущественного теплоотвода.

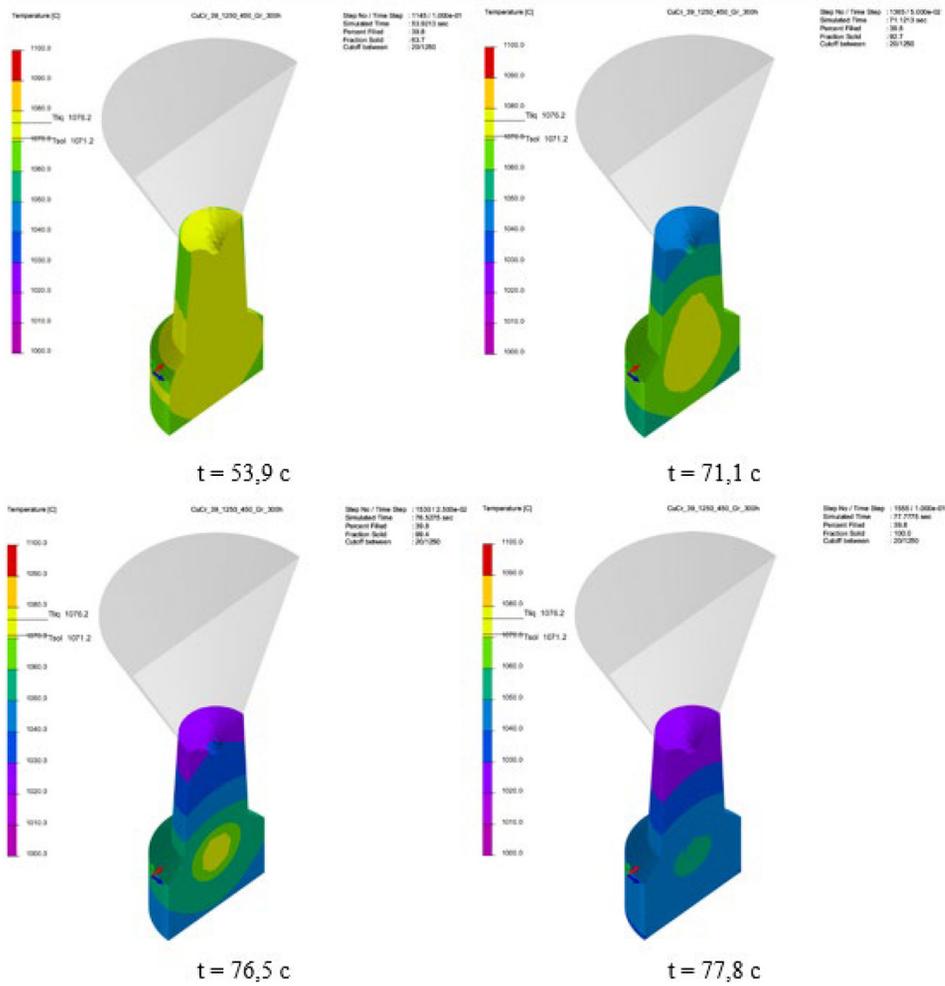


Рис. 7. Температурное поле при остывании расплава в металлической форме

Fig. 7. Temperature field during cooling of the melt in a metal mold

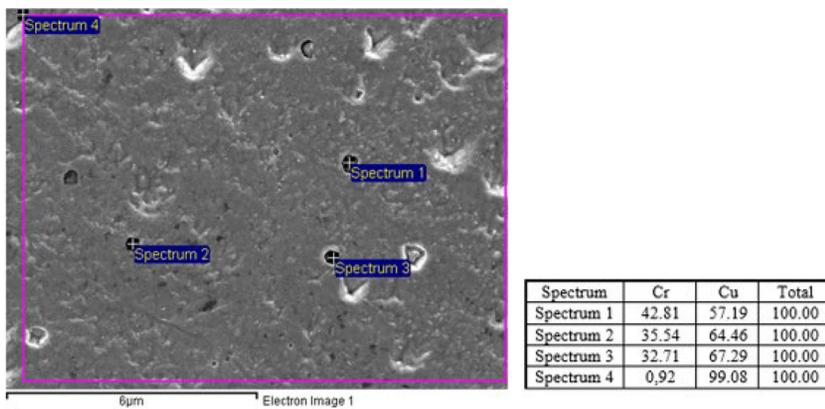


Рис. 8. СЭМ-изображение микроструктуры литого сплава с элементным составом

Fig. 8. SEM image of the microstructure of a cast alloy with elemental composition



Рис. 9. Макроструктура с градиентами температур (а) и микроструктура с распределённой микропористостью (б) литого электрода

Fig. 9. Macrostructure with temperature gradients (a) and microstructure with distributed microporosity (b) of a cast electrode

В области «теплового узла» формируется равноосная крупнозернистая структура. Такая структура отливки, имеющая три зоны, характерна при заливке металла в металлическую форму. Поскольку нижняя часть отливки имеет большее сечение по отношению к верхней части, создаются неблагоприятные условия для образования сосредоточенной усадочной раковины. Это приводит к образованию усадочной микропористости в области «теплового узла». На рис. 9а показаны градиенты температур белыми стрелками, а белым кольцом – зона «теплового узла» с распределённой микропористостью (рис. 9б).

Термообработка, включающая операции «заковки», при которой происходит фиксация α твердого раствора, пересыщенного хромом, и «старения», в результате которого происходит дисперсионное упрочнение за счет выделения частиц хрома [8, 9]. В процессе заковки, при которой необходим нагрев до температуры 950 °С, выдержка в течение 1 часа и охлаждение в воде, происходит повышение содержания хрома в α твердом растворе до 0,3 %, что находится в соответствии с диаграммой состояния Cu–Cr (рис. 10).

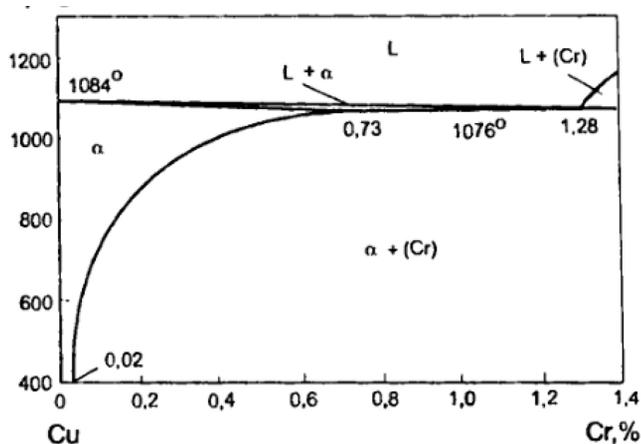


Рис. 10. Диаграмма состояния Cu–Cr [8]

Fig. 10. Phase diagram of Cu–Cr [8]

Данная технология литья электродов позволяет производить закалку через несколько секунд после заливки металла в металлическую форму, когда металл имеет двухфазное, твердодожидкое состояние. После заливки металла в металлическую форму по истечении 10 секунд (рис. 4) происходит кристаллизация зоны, прилегающей к поверхности формы. В это время выполняется извлечение отливки из формы и закалка в воде. Макроструктура отливки имеет достаточно дисперсное строение (рис. 11а). Это связано с большой степенью переохлаждения жидкого сплава за счет быстрого охлаждения, которое происходит в воде. Увеличение степени переохлаждения приводит к повышению числа центров кристаллизации, уменьшению скорости их роста и, как следствие, измельчению структуры отливки. В соответствии с законом Холла–Петча измельчение зерна сопровождается увеличением прочности.

В процессе старения данных отливок происходят изменения макроструктуры, что проявляется в формировании достаточно однородной структуры (рис. 11б). Это связано с диффузионными процессами, сопровождающимися уменьшением градиента концентрации легирующего элемента по сечению зерен.

После литья-закалки (рис. 12а) и литья-закалки-старения (рис. 12б) композиционного материала наблюдается формирование равноосной однородной структуры (рис. 12) с наличием двойников, а это благоприятно сказывается на формировании свойств материала [10,11].



Рис. 11. Макроструктура литых электродов: (а) литье-закалка; (б) литье-закалка–старение
Fig. 11. Macrostructure of cast electrodes: (a) casting-hardening; (b) casting-hardening-aging

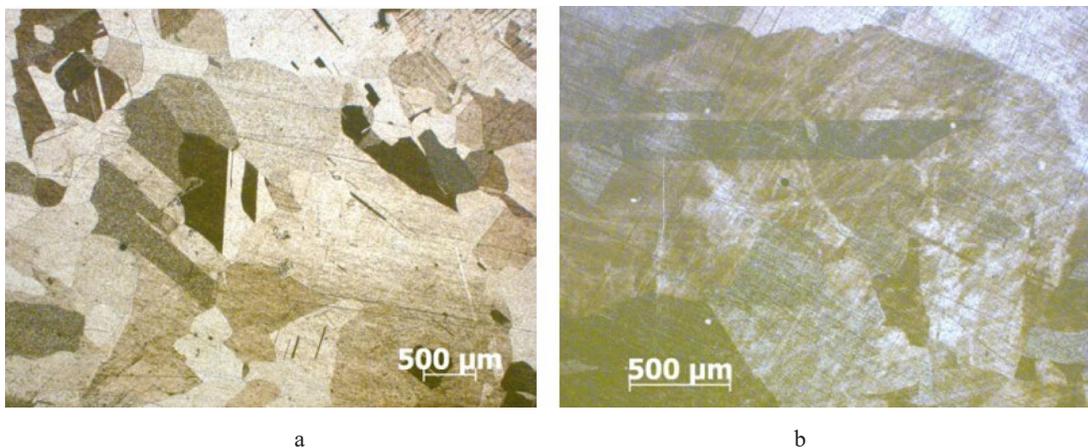


Рис. 12. Микроструктура литого электрода: а – литье-закалка; б – литье-закалка–старение
Fig. 12. Microstructure of a cast electrode: a – casting-hardening; b – casting-hardening-aging

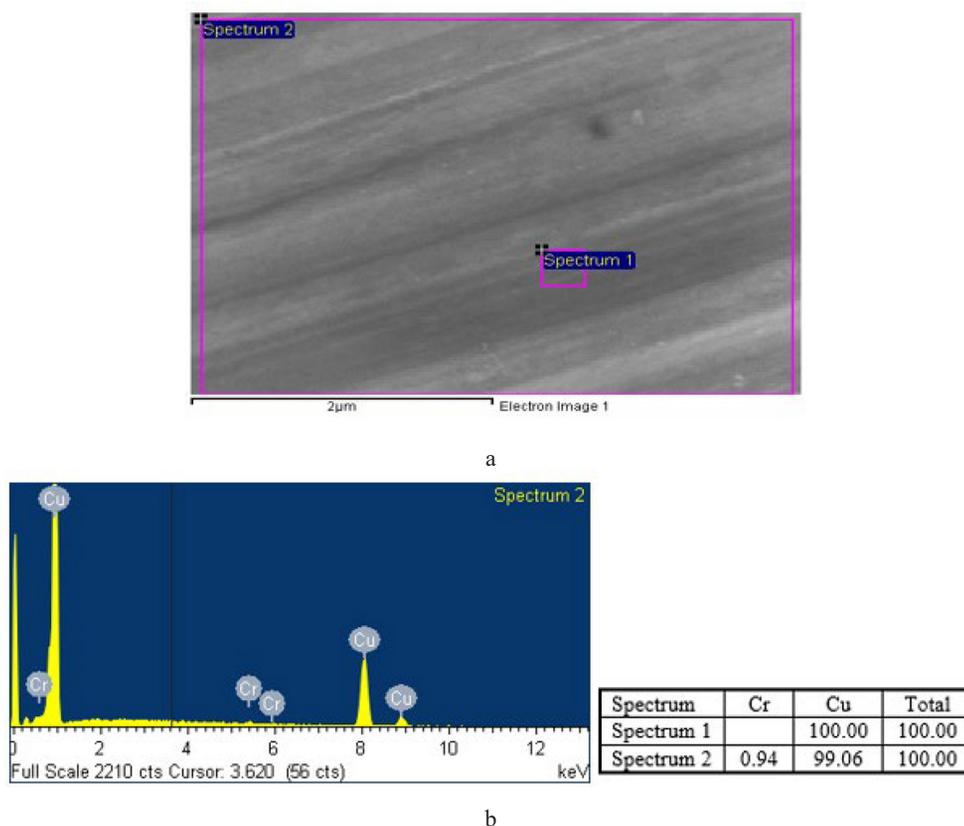


Рис. 13. СЭМ-изображение микроструктуры литого электрода (а) и спектра 2 (b)

Fig. 13. SEM image of the microstructure of the cast electrode (a) and spectrum 2 (b)

Микроструктура (рис. 13а) и элементный состав поверхности образца электрода (рис. 13б) показывают количественное содержание хрома в композиционном материале после операции старения. Эффект дисперсионного твердения при старении обеспечивает увеличение твердости и прочности материала [8].

3.4. Исследование физико-механических свойств литого композиционного материала Cu–MMNCr

После термообработки, состоящей из операций закалки и старения, микротвердость HV по сечению рабочей части электрода с наноразмерным хромом распределяется следующим образом (рис. 14). Видно, что в центральной зоне (расстояние от оси 6 мм) во всех слоях твердость имеет повышенные значения, которые можно объяснить тем, что это центральная область вихревого характера движения расплава при заливке его в металлическую форму (рис. 2) и здесь имеется повышенная концентрация наноразмерных частиц хрома.

Значения твердости НВ и средней микротвердости НВ литых – закаленных и литых – закаленных – состаренных электродов приведены на рис. 15.

Повышение твердости хромовой бронзы в процессе старения связано с эффектом дисперсионного твердения, вызванного выделением дисперсных частиц хрома из пересыщенного

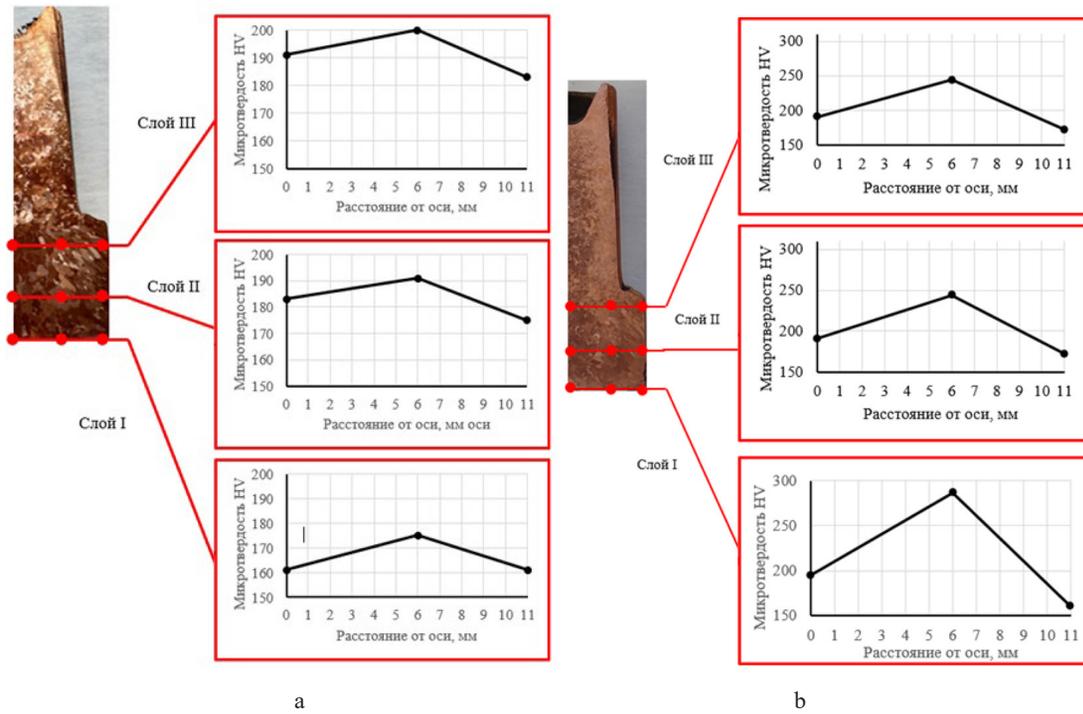


Рис. 14. Распределение микротвёрдости HV по сечению рабочей части электрода после литья в металлическую форму: (а) с закалкой; (б) с закалкой и старением

Fig. 14. Distribution of microhardness HV over the cross section of the working part of the electrode after casting into a metal mold: (a) with hardening; (b) with hardening and aging

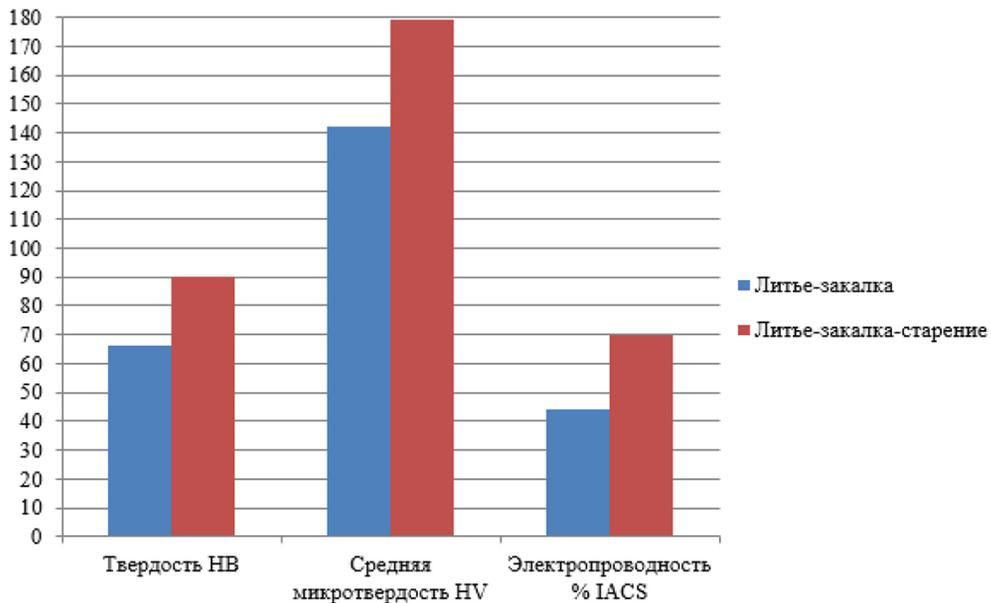


Рис. 15. Значения твердости, средней микротвердости и электропроводности литых –закаленных и литых-закаленных-состаренных электродов

Fig. 15. Values of hardness, average microhardness and electrical conductivity of cast-hardened and cast-hardened-aged electrodes

твердого раствора. Степень пересыщения определяется температурой закалки, так как растворимость хрома в α твердом растворе увеличивается с повышением температуры (рис. 10). Температура закалки ограничивается линией солидуса, поэтому при традиционной термической обработке в твердый раствор переходит не более 0,4 % Cr. В данном случае образец закалывали практически сразу после заливки в металлическую форму, когда он находился в твердожидком состоянии. Такая технология обеспечивает повышенное содержание хрома в твердом растворе, что приводит к повышению твердости после старения по сравнению с твердостью, получаемой после стандартной термической обработки.

Хорошая электропроводность определяется минимальной концентрацией легирующих элементов в медном твердом растворе при старении. После закалки легирующий элемент остался в твердом растворе. Это привело к снижению электропроводности до 44 % IACS у литого – закаленного электрода. После проведения термообработки (закалка–старение) прослеживалось увеличение электропроводности до 70 % IACS по сравнению с литым-закаленным электродом (рис. 15), что напрямую связано с диффузионными процессами и выделением упрочняющих частиц, а также к перемещению легирующих элементов на границы зерна. При таких процессах улучшается электропроводность материала за счет очистки зерен от легирующих элементов.

Заключение

1. Установлено на основании компьютерного моделирования количественное термодинамическое описание поведения расплава при моделировании свободной (гравитационной) заливки расплава в металлическую форму для получения электрода контактной сварки, образование однородного вихря кругового сечения и показано, что расплав вращается как «твёрдое» тело с постоянной угловой скоростью. Вне такого вихря невихревое движение расплава по вертикальной оси Z постепенно затухает. Такой характер гидродинамики расплава приводит к формированию вокруг частицы слоя, пресыщенного концентрацией хрома в расплаве меди, без притока свежих порций меди, что существенно замедляет и фактически останавливает процесс растворения частицы и при охлаждении приводит к выделению хрома в виде дендритов. Кроме того, не позволяет ещё не растворившимся наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава. Этот процесс прослеживается до полного заполнения металлической формы. Такой характер гидродинамики расплава оказывает влияние на формирование структуры и свойств композиционного материала.

2. Показано образование в массивной (рабочей) части электрода на завершающей стадии кристаллизации «теплового узла», приводящего к образованию зоны, распределённой микропористости.

3. Приведен элементный состав композиционного материала после литья без проведения операций термообработки с наличием в микроструктуре нерастворившихся наноразмерных частиц хрома, которые взаимодействуют с границами зерен, действуя как точки закрепления, замедляя или останавливая их рост.

4. Элементный состав поверхности образца электрода показывает на наличие содержания хрома в α твердом растворе, обеспечивающего эффект дисперсионного твердения при старении, который выражается в увеличении твердости до 90 НВ, микротвердости до 179 НВ и электропроводности до 70 % IACS.

Список литературы / References

- [1] Liao Q., Ge P., Lu G., Song Y., et al. Simulation Study on the Investment Casting Process of a Low-Cost Titanium Alloy Gearbox based on ProCAST, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article ID 4484762, 10 P. <https://doi.org/10.1155/2022/4484762>.
- [2] *Unified numbering system (UNS) for Copper and Copper Alloys*.
- [3] Бусыгин С.Л., Токмин А.М., Довженко Н.Н., Казаков В.С. Влияние технологии изготовления на свойства электродов из хромистой бронзы для контактной рельефной сварки арматурных стержней, *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(8), 914–929. [Busygin S. L., Tokmin A. M., Dovzhenko N. N., Kazakov V. S. The Influence of Manufacturing Technology on the Properties of Chromium-Bronze Electrodes for Contact Relief Welding of Reinforcing Rods, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, 14(8), 914–929. (in Russian)] DOI: 10.17516/1999–494X-0368.
- [4] Ахметов Д.Г. Формирование и основные параметры вихревых колец, *Прикладная механика и техническая физика*, 2001, 42 (5), 70–83. [Ahmedov D. G. Formation and basic parameters of vortex rings, *Applied mechanics and technical physics*, 2001, 42(5), 70–83. (in Rus.)]
- [5] Сулицин А.В., Мысик Р.К., Брусницын С.В., Логинов Ю.Н. *Непрерывное литье меди*. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. 374 с. [Sulitsin A. V., Mysik R. K. Brusnitsyn S. V. Loginov Yu. N. *Continuous copper casting*. Ekaterinburg, UMTS UPI, 2016, 374 p. (in Rus.)]
- [6] Batra I. S., Dey G. K., Kulkarni U. D., Banerjee S. Microstructure and properties of a Cu–Cr–Zr alloy, *Journal of Nuclear Materials*. 2001, 299 (2), 91–100. [https://doi.org/10.1016/S 0022–3115 \(01\)00691–2](https://doi.org/10.1016/S 0022–3115 (01)00691–2).
- [7] Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review, *Metals*, 2014, 4 (1), 65–83. <https://doi.org/10.3390/met4010065>.
- [8] Осинцев О.Е., Федоров В.Н. *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник*. М: Машиностроение, 2004. 336 с. [Osintsev O. E., Fedorov V. N. *Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: Directory*. Moscow, Mechanical engineering, 2004, 336 p. (in Rus.)]
- [9] Дриц М.Е. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник*. М.: Наука, 1979. 248 с. [Drits M. E. *Dual and multicomponent copper-based systems: directory*. Moscow, Science, 1979, 248 p. (in Rus.)]
- [10] Николаев А.К., Новиков А.И., Розенберг В.М. *Хромовые бронзы*. М.: Metallurgia, 1983. 176 с. [Nikolaev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M. *Chromium bronze*. Moscow, Metallurgiiia, 1983, 176 p. (in Rus.)]
- [11] Мальцев В.А. *Металлография промышленных цветных металлов и сплавов*. М.: Metallurgia, 1970. 368 с. [Maltsev V. A. *Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiiia, 1970, 368 p. (in Rus.)]