

УДК 621.746;669.189

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

© 2009 С. Ф. Тлустенко, А. М. Бибииков, Л. В. Журавель, А. А. Коптев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлена методика получения заготовок из литья, позволяющая управлять составом и структурой материала заготовок за счет вариаций химического состава, температурных режимов, а также искусственных механических, магнитных и других воздействий на расплав в процессе его кристаллизации. Исследована взаимосвязь получаемой микроструктуры и механических свойств материала.

Технология литья, кристаллизация, микроструктура, фазовый состав, прочность, пластичность, температурный режим

Развитие научных основ литейного производства позволяет расширить номенклатуру ответственных деталей из литых заготовок. Построение физических и математических моделей литейных процессов создает основу для их автоматизации. Формирование макро- и микроструктуры стали производится по различным технологическим схемам, начиная с получения заготовок и в зависимости от назначения изготавливаемых из них деталей. Получение заготовок способами литья требует в настоящее время создания такой базы математических моделей металлургических процессов, которые комплексно описывали бы химический состав, способы литья, параметры процессов, оборудование и др. в статике и динамике, а также и как носителей наследственной информации. Технологическое наследование свойств должно быть управляемым процессом, так как даже один и тот же способ формирования состава и структуры заготовок может давать различные свойства металла в зависимости от условий процесса. Следовательно, процесс кристаллизации слитка описывается не только физической моделью, но вполне определенными аналитическими взаимосвязями параметров процессов. Появляется возможность получения расчетным путем относительных значений интенсивности остаточного среднего нормального напряжения δ°/τ_s остаточных напряжений T°/τ_s , где T° - интенсивность касательных остаточных напряжений, δ° - среднее нормальное остаточное напряжение, τ_s - сопротивление деформации при чистом сдвиге. Характер формирующейся дислокационной структуры, плотность распределения микропор и микротрещин, микродефектов внут-

ренней структуры также зависят от условий техпроцесса литья заготовок. Внешнее механическое, акустическое, магнитное воздействие на металл при его кристаллизации оказывает влияние на внутренние процессы фазовых превращений, кристаллизацию и рекристаллизацию, диффузию и характер ликваций и сопровождается геометрическим изменением окрестности исследуемых элементов микроструктуры. Такое формоизменение некоторой частицы $M_0(x_i)$ за время d_t можно представить в виде разложения в ряд непрерывной функции приращения перемещений du_i . За время d_t вектор $\overline{M_0M_1}$ в окрестности частицы M_0 перемещается в положение $\overline{M_0M_1}$, скаляр вектора и угол поворота относительно точки M_0 представляются тензорами второго ранга: приращением деформаций с компонентами $dl_{ij} = \frac{1}{2}(du_{ij} + du_{ji})$ и приращением углов поворота с компонентами $d\Phi_k = \frac{1}{2}(du_{ij} - du_{ji})$.

Кинетика роста кристаллов из жидкого расплава металла в момент соприкосновения отдельных их граней изменяется, развиваются только свободные их грани, происходит нарушение правильной геометрической формы и образуются кристаллиты (зерна) с размерами, зависящими от условий кристаллизации. В работе предлагается регулировать процесс получения мелкого зерна при затвердевании металла внешним воздействием на центры кристаллизации, способствующим получению мелкого зерна, то есть регулирования механизма образования кристаллов. Формоизменение окрестности

образовавшейся частицы M_0 связано с появлением внутренних напряжений и соответствующих деформаций образующихся структур. Для количественной оценки формирующейся структуры с упруговязкопластическими свойствами используются инвариантные характеристики интенсивности сдвига H , степени деформации сдвига ν , относительного изменения объема ε , среднего нормального напряжения δ и интенсивности касательных напряжений T . После окончания кристаллизации и дальнейшего снижения температуры слитка происходит неуправляемое остаточное формоизменение окрестности частицы M_0 при создаваемых соответствующих локальных и общих напряженно-деформированных состояниях. Уровень остаточных напряжений можно характеризовать относительным значением интенсивности касательных остаточных напряжений T°/τ_s , относительным значением среднего нормального остаточного напряжения δ°/τ_s и показателем Лоде μ_δ^0 .

Характер окончательных свойств металла и его структура после затвердевания для применяемого способа литья заготовок определяется нестационарностью процесса кристаллизации и градиента температуры по объему слитка, поэтому дифференциальные уравнения равновесия конкретной структуры и состава при определенных или варьируемых начальных и граничных условиях решаются методом конечных элементов с использованием адекватных программ.

Анализ полученных результатов показывает, что точность получаемых решений зависит от правильности выбора математической модели технологических процессов получения отливок и определяющих соотношений факторов процесса. Математическое моделирование процессов получения отливок позволяет обеспечивать гарантированные свойства металла в зависимости от условий эксплуатации, то есть обеспечивать такое соотношение δ/τ_s и μ_δ , при котором разрушение металла не наступит при допустимых величинах пластической деформации. Анализ диаграммы пластичности получаемого сплава по зависимости $L_p\left(\frac{\delta}{\tau_s}, \mu_\delta\right)$ по-

казывает на качественном уровне законо-

мерности изменения пластичности металла в области вязкого разрушения, а также соотношение показателей $\frac{\delta}{\tau_s} > \left(\frac{\delta}{\tau_s}\right)_{nx}$, характе-

ризующее протяженность области хрупкого разрушения, и значения показателя

$\frac{\delta}{\tau_s} > \left(\frac{\delta}{\tau_s}\right)_n$, устанавливающие область суще-

ствования неограниченной пластичности. Это позволяет научно обосновать ресурс деталей, получаемых из литья, по основным факторам, определяющим процесс задержанного разрушения. Ими являются поврежденность металла (w), химический и фазовый составы, показатели напряженного состояния δ°/τ_s , T°/τ_s , μ_δ° , химический состав и ликвации, фазовый состав и фазовая стабильность сплава, количество полных и частичных дислокаций. Моделирование литейного производства проведено, в частности, по конкретным изделиям - бурильным трубам, работающим в условиях высоких знакопеременных нагрузок и агрессивной среде.

Разработка способа испытания образцов с учетом влияния на результат различных факторов проводилась по целевой функции – времени и характере разрушения.

Повышение качества литья по предлагаемой методике при сравнении с другими заготовительными литейными производствами отличается высоким коэффициентом использования металла, который приближается к 95...98%. Наряду с этим литейное производство обеспечивает получение сложных по геометрии и конфигурации литых заготовок с внутренними полостями, что практически невозможно получить методами сварки иковки. Применение литых деталей в высоконагруженных особо ответственных машинах и механизмах, где их выход из строя приводит к катастрофическим последствиям и значительным экономическим потерям, стало возможным благодаря тому, что выросла их надёжность [2]. Основная характеристика таких деталей – гарантия их безотказной работы. В настоящее время конструирование литых деталей – область эмпирических решений и приближённых расчетных методов. Создание отливок высокой надёжности возможно только на основе использования расчетов характеристик мате-

риала и выбора прогрессивной технологии деталей. Важную роль на свойства материала оказывают условия затвердевания отливок. В настоящее время существуют теории кристаллизации, которые изложены в ряде работ [3, 4]. Процессы кристаллизации жидких металлов сопровождаются образованием кристаллов твердого вещества и формированием определенной структуры.

Процесс кристаллизации, совершающийся в неравновесных условиях, изучается и создателями теории синергетики [3]. Теория синергетики (самоорганизации) в последнее время привлекает все большее внимание. При этом металл, находящийся в жидком состоянии, рассматривают как открытую систему, которая обменивается энергией с внешней средой по определенным схемам. Такая система находится далеко от термодинамического равновесия. Динамика подобных систем определяется и областью за точкой бифуркации, после которой систему еще можно каким-либо образом свести к линейной. Эта область (далекая от состояния термодинамического равновесия), по определению её авторов, называется диссипативной структурой. Изучение диссипативных структур связано с проблемами описания роста кристаллов, а также проблемами описания динамики плавления и кристаллизации различных сплавов.

Физические и химические процессы, протекающие в жидких металлических расплавах при охлаждении, существенно определяют его структуру и свойства. Современное состояние теории сплавов требует дальнейших углубленных исследований влияния условий формирования их структуры, вида структурных переходов в твердое состояние в процессе кристаллизации, применяемой технологии производства на структуру, механические свойства и ресурс деталей из них.

Целью изучения проблемы является определение связи технологических и других факторов изготовления литых заготовок с их механическими свойствами для прогнозирования свойств материала в зависимости от выбора оптимальных условий процессов.

Построение математических моделей технологических процессов проводилось с использованием компьютерной программы «Сплав». Возможности данной программы дополнительно позволяют в состав модели

вводить реальные показатели характеристик внутренней энергии связей и структуры благодаря открытию связей энергетических характеристик формирующейся структуры с механическими свойствами материалов и использованию их в качестве условных показателей в расчетах.

Методика экспериментального определения энергетических характеристик существует и обрабатывается.

Программа «Сплав» позволяет рассчитать удельную мольную энергию связи, удельную объёмную энергию связи и предел прочности в широком диапазоне температур, а также плотность и объём поля сплава при нормальной температуре. По химическому составу возможности программы ограничиваются имеющейся базой данных при расчете физических и механических свойств получаемых сплавов.

База данных состоит из элементов: Li, Be, C, G -графит, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Cs, Ta, W, Os, Ir, Pt, Au, Pb, Bi, Sb, Sc.

По просьбе пользователя набор доступных элементов может быть изменён или расширен. Исключение составляют газообразные, жидкие и радиоактивные элементы. Основой сплава может быть любой металлический элемент, входящий в базу данных.

Для правильной постановки и представления условий задачи, соответствующей выбору основы и компонентов сплава из доступных элементов, производится предварительный просмотр возможных вариантов решений при допустимых вариациях параметров и компонентов микроструктур, температурных режимов при определении задаваемых и требуемых значений предела прочности σ_b , других характеристик.

Автоматически определяются следующие характеристики: $\Delta E_{г.с.}$ - удельная мольная энергия связи в кгс·м/моль; σ_{max} - удельная объёмная энергия связи в кгс·мм/мм³, численно равная максимальному пределу прочности образца со специально подобранным надрезом в кгс/мм², предел прочности σ_b в кгс/мм² при заданных температурах испытания. Плотность D в г/см³ и объём моля V в см³ определяются только для температуры 293°K(20°С).

Для прогнозирования свойств материала и определения прогрессивной технологии была выбрана высокопрочная немагнитная сталь 45×6 Г13Н7ФЛ, из которой изготавливаются утяжеленные бурильные трубы для нефтегазовой промышленности. Сначала было проведено определение свойств заготовок бурильных труб, полученных различными способами. Учитывалось, что развитая дислокационная структура дает меньшее зерно.

Исследованию подвергались трубные заготовки из высоколегированных немагнитных сталей, изготовленные полунепрерывным способом литья и центробежным. К первой группе образцов относится трубная заготовка, полученная полунепрерывным способом, внешний диаметр заготовки – 112 мм, внутренний – 45 мм, образцы вырезались из трубы длиной 1000 мм.

Сравнительным исследованиям подвергались также образцы второй группы, вырезанные из трубных заготовок, полученных центробежным способом литья (образцы №2, 3).

Определение химического состава образцов проводилось на электронном микроскопе типа «Philips - 525» при ускоряющем напряжении $U = 15$ кВ (рентгеноспектральный анализ).

Механические свойства образцов, вырезанных из заготовок, полученных полунепрерывным (№ 1), центробежным (№ 2 и № 3), способами литья даны в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства образцов

№ образца	σ_T	σ_B	δ , %	ψ , %	a_k	НВ
1	89,1	104,8	21,2	23,9	4,03	285
	86,3	102,8	26,4	28,7	3,04	
2	58,0	82,9	22,0	34,0	10,2	170
	58,0	80,6	26,6	32,2	10,2	
3	54,1	83,2	33,6	41,1	11,7	207
	53,7	82,8	34,0	38,9	12,0	
Требуемые свойства	$\sigma_T \geq 60$	$\sigma_B \geq 90,0$	$\delta \geq 15,0$	$\psi \geq 15,0$	$a_k \geq 3,0$	260 - 300

Результаты определения расчетным способом удельной мольной энергии связи $\Delta E_{э.с.}$, удельной объемной энергии связи (σ_{max}), плотности, объема моля и оптималь-

ного предела прочности сплавов данного химического состава даны в табл. 2.

Исследования микроструктуры сплавов для бурильных труб проводились на металлографическом микроскопе МИМ-8М при увеличениях 100 и 300 крат.

Таблица 2 – Расчетные данные

№ п/п	Символ элемента	% весовой	$\Delta E_{э.с.}$ в кгм/моль при $T_{исп.}$ в °К	
			T_1	T_2
			293	373
1	Fe	74,040	1082,246	1025,248
2	C	0,450	21,315	21,873
3	Si	0,400	-6,642	-6,315
4	Mn	12,500	-60,652	-59001
5	Cr	5,300	-5,305	-8,034
6	Ni	6,300	32,303	30,228
7	V	0,800	5,465	5,363
8	P	0,200	-4,943	-4,914
9	S	0,01	-0,241	-0,236
$\Delta E_{э.с.}$, кгм/моль			1063,5	1004,2
σ_{max} , кгс мм/мм ³			11,7	105,5
σ_B оптим., кгс/мм ²			92,4	87,2
D – плотность сплава при 20 °С, г/см ³				7,8
$V_{моля}$ – объем моля сплава при $T=+20$ °С, см ³				9,52

Травление образцов осуществлялось в растворе, содержащем 3 части HCl и 1 часть HNO₃.

Микроструктура сталей представлена на рис.1 – 3. (образцы № 1 - 3).

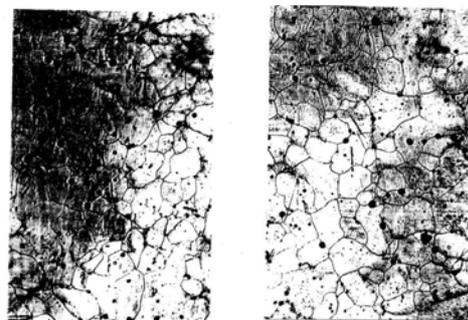


Рис. 1. Микроструктура стали, полученная полунепрерывным способом литья, ×300 (образец №1)

Образец № 1 представляет собой мелкозернистую структуру со средним размером зерна $\approx 0,1$ мм. В структуре наблюдается незначительное выделение карбида хрома $Me_{23}C_6$,

который благоприятно может выделяться из раствора при медленном охлаждении, а также после повторного нагрева в интервале температур 450...800°C. Очень длительный повторный нагрев также способствует выделению карбида хрома внутри зерен. Не исключено, что в структуре могут наблюдаться и другие карбиды, интерпретация которых несколько затруднена.

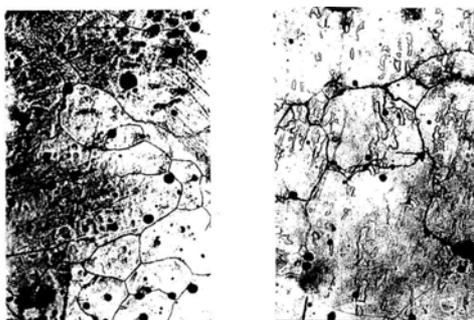


Рис. 2. Микроструктура стали, полученная центробежным способом литья, $\times 300$ (образцы №2, №3)

При центробежном литье (образцы №2, 3) зерна имеют довольно большие размеры (размер зерен 0,3...0,7 мм), карбидные выделения довольно большие и их количество также высокое.

Более детальная картина формирования структур сталей может быть получена при рентгеноструктурном контроле.

Был рассмотрен характер разрушения образцов № 1 - 3. На образце №1 излом является равномерным по всему сечению, мелкозернистым, что свидетельствует о высоких прочностных характеристиках материала. Это, в свою очередь, связано с тем, что структура образца №1 – мелкозернистая.

На образцах №2, 3 наблюдается грубое разрушение материала, при этом наблюдаются несплошности материала в виде темных участков. Наличие вытянутого зерна свидетельствует о разупрочнении металла по механизму динамической полигонизации.

Общий характер изломов представляется как хрупкое разрушение сталей под действием ударной нагрузки.

Более детальная картина поверхности разрушения образцов была рассмотрена на основе комплексных металлографических исследований заготовок.

Поверхность излома образца №1 (рис. 1) представлена несколько вязким по отношению к образцу №3, где излом проходит по

границам зерен, и, кроме того, границы являются очагами разрушения материала.

Таким образом, анализируя характер изломов образцов № 1-3, можно сделать вывод о хорошем качестве материала образца № 1.

Наличие в образцах №2 и № 3 структурной неоднородности и дефектов в виде несплошностей материала по границам зерен могло привести к разрушению деталей при их эксплуатации.

На основании проведенной работы можно сделать выводы:

1. Применение компьютерной программы «Сплав» позволяет расчетным путем точнее определить свойства материала.
2. По расчетной модели и заданным свойствам материала технолог проектирует оптимальную технологию изготовления заготовок.

Библиографический список

1. Горемыкина, С.С. Исследование неустойчивости дендритных кристаллов стали в процессе затвердевания / С.С. Горемыкина, Л.В. Костылева, В.А. Ильинский // *Металлургия машиностроения.*-2003.- №1. - С.35-39.
2. Костылева, Л.В. Особенности кристаллизации сталей в интервале температур ликвидус - солидус / Л.В. Костылева, Н.И. Габельченко, В.А. Ильинский // *Металловедение и термическая обработка металлов.*-2000.- №4. -С.31-34.
3. Ильинский, В.А. Исследование кристаллизации углеродистых сталей / В.А. Ильинский, Л.В. Костылева, Е.А. Санталова // *Процессы литья.*-2003. - №2.
4. Костылева, Л.В. Качественный прогноз дисперсности дендритной структуры литых деталей и сплавов / Л.В. Костылева, Н.И. Габельченко, В.А. Ильинский // *Изв.вузов. Черная металлургия.*- .2007.-№11. - С.45-49.
5. Катаржин, А.И. Термокинетические особенности структурообразования в интервалах локальной кристаллизации стальных и чугуновых отливок / А.И. Катаржин [и др.] // *Металлургия машиностроения.* - 2003.- №5.- С.23-26.

References

1. Goremikina S.S., Kostilyova L.V., Ilyinsky V.A. Analysis of instability of dendritic steel crystals during solidification processes // *Metallurgy of machine-building.* 2003. №1. p.35-39.

2. Kostilyova LV., Gabelychenko N.I., Ilyinsky V.A. Peculiarities of steel crystallization during the liquidus-solidus temperature interval // Metals Science (Physical Metallurgy) and thermal metal working. 2000. №4. p.31-34.

3. Ilyinsky V.A, Kostilyova LV., Santalova E.A. Research of carbon steel crystallization // Casting processes. 2003. №2.

4. Kostilyova LV., Gabelychenko N.I., Ilyinsky V.A. Quality forecast of dispersity of

dendritic structure of cast steels and alloys // University News. Ferrous metallurgy. 2007, №11. p.45-49.

5. Katarzhin A.I., Sukhanova E.A., Kostilyova LV., Ilyinsky V.A Temperature-kinetic peculiarities of structure formation within the intervals of local crystallization of steel and cast-iron forming // Metallurgy of machine-building. 2003. №5. p.23-26.

FORECASTING OF THE PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS AND THE CHOICE OF OPTIMAL TECHNOLOGIES OF THEIR PRODUCTION

© 2009 S. F. Tlustenko, A. M. Bibikov, L. V. Zhuravel, A. A. Koptev

Samara State Aerospace University

The method of billets production by casting has been introduced. It allows controlling the composition and the structure of the billets' material at the expense of variations of chemical structure, temperature regimes, as well as artificial mechanical and other impacts on the flux during crystallization processes. The interdependence between the produced structure and mechanical properties of the material has been researched.

Technology of casting, crystallization, microstructure, phase composition, durability, plasticity, temperature regimes

Информация об авторах

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-46-01. E-mail: titan250@mail.ru. Область научных интересов: исследование взаимосвязи механических свойств материалов и состава, процессов литья и обработки металлов давлением.

Бибиков Алексей Михайлович, заведующий лабораторией Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 960-818-30-46. Область научных интересов: литейное производство, управление процессами кристаллизации, изучение микроструктуры металлов.

Журавель Леонид Васильевич, кандидат технических наук, заведующий отраслевой лабораторией, Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 927-707-41-72. Область научных интересов: проектирование технологических процессов получения сплавов с заданными свойствами.

Коптев Андрей Анатольевич, индустриальный директор завода «Контактор». Тел. 842-267-52-59. Область научных интересов: анализ и изучение факторов, определяющих ресурс и надежность изделий.

Tlustenko Stanislav Fedotovich, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Samara State Aerospace University. Phone: (846) 267-46-01. E-mail: titan250@mail.ru. Area of research: mechanical properties of materials on the composition, casting processes and metal forming.

Bibikov Aleksey Mikhaylovich, Head of the Research Laboratory 4, Samara State Aerospace University. Phone: 960-818-30-46. Area of research: foundry, controlling crystallization processes, study of the microstructure of metals

Zhuravel Leonid Vasilyevich, Candidate of Technical Science, Head of the branch laboratory of Samara State Aerospace University. Phone: 927-707-41-72. Area of research: designing of technical processes of alloys production with the input properties.

Koptev Andrey Anatolyevich, Industrial Director of “Kontactor” plant. Phone: (842) 267-52-59. Area of research: analysis and studying of the factors determining durability and reliability of production.