

*Analysis of technological process of pouring into coated iron chill is presented. It is shown that the process is very sensitive to the change of technological parameters, is rather complex in regulation and control.*

А. Н. КРУТИЛИН, Р. Э. ТРУБИЦКИЙ, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, БНТУ

УДК 621.74

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ В ОБЛИЦОВАННЫЙ КОКИЛЬ

Технический прогресс в области двигателестроения, направленный на увеличение удельной мощности, долговечности и экономичности современных двигателей, неизбежно связан с ростом давлений, механической и тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы, к числу которых относятся гильзы цилиндров. Условия эксплуатации гильз цилиндров предъявляют высокие требования к качеству деталей, стабильности геометрических размеров, физико-механическим и эксплуатационным свойствам литых заготовок.

Для изготовления отливок гильз цилиндров наибольшее распространение получили способы литья в сырые песчаные формы и центробежный способ литья. Характерной особенностью данных способов литья является повышенная дефектность отливок, сложность обеспечения необходимой структуры на рабочей поверхности гильз.

При литье в сырые формы применяют как обычные литейные конвейеры, так и высокопроизводительные автоматические формовочные линии с автоматизированными комплексами смесеприготовления, которые основаны на использовании более совершенных методов формообразования и высококачественных формовочных материалах. Основные недостатки процесса: низкий выход годного литья (45–60%), наличие больших припусков на механическую обработку (до 4 мм), большие грузопотоки формовочных материалов, высокая трудоемкость, громоздкость основного и вспомогательного оборудования, низкая культура производства. Брак (раковины газоусадочного происхождения, засоры по вине литейной формы и т. д.) достигает 20%. Коэффициент использования металла составляет около 0,5.

Основной тенденцией развития производства гильз цилиндров за рубежом является увеличение

объема производства заготовок на автоматизированных многопозиционных карусельных машинах центробежного литья. Для получения качественного литья применяют сухие формы или разъемные изложницы, на рабочую поверхность которых наносят различные облицовки, обеспечивающие получение необходимой структуры чугуна. Высокий технический уровень способа достигнут благодаря применению разъемных кокилей с профильной рабочей полостью, устройств термостатирования оснастки, позднему модифицированию жидкого металла, а также использованию автоматических дозаторов при разливке. При использовании центробежного способа литья отпадает необходимость в литниковой системе, формовочных смесях и связанных с ними оборудованием и грузопотоками.

Основные недостатки центробежного способа литья определяются условиями формирования заготовки. Неметаллические включения, находящиеся в металле, под действием центробежных сил оттесняются на внутреннюю часть заготовки. Наиболее плотный металл оказывается на периферии отливки, а менее плотный – на рабочей части поверхности гильз цилиндров, т. е. имеет место нестабильность микроструктуры по строению и формы графита. Заготовки имеют большие припуски на механическую обработку (3–5 мм) и, как следствие, малый коэффициент использования металла (0,14–0,2). Колебания по толщине стенок заготовки  $\pm 10\%$  (для сравнения – при литье в разовые песчано-глинистые формы  $\pm 3\%$ ). Выход годного литья не превышает 85%.

По сравнению с литьем в песчано-глинистые формы центробежный способ литья позволяет получать отливки с более высокими физико-механическими свойствами. Уменьшается расход формовочных и стержневых материалов, отпадает не-

обходимость в операциях по удалению литников, выпоров, прибылей, увеличивается производительность труда. Однако требования к структуре гильз по равномерности распределения, форме и размерам включений графита при литье в сырые песчаные формы могут быть обеспечены надежнее и стабильнее, чем при центробежном способе литья.

Таким образом, в производстве заготовок гильз цилиндров традиционными способами литья острыми остаются вопросы рационального использования металла, повышения эксплуатационных характеристик деталей, улучшения качества литья. Рассмотренные способы литья, несмотря на многочисленные недостатки, в ближайшие годы будут преобладающими, так как они наиболее освоены и технологически просты.

Высокое качество гильз цилиндров ведущих западных фирм обусловлено не специфическими особенностями технологического процесса, а хорошей организацией производства, четким соблюдением технологических параметров процесса, тщательным контролем шихтовых и формовочных материалов, высокой степенью механизации и автоматизации технологического процесса.

Ввиду постоянного повышения требований к качеству отливок, экономии материальных, топливных и энергетических ресурсов существует необходимость в разработке и совершенствовании технологических процессов изготовления гильз цилиндров на качественно более высоком уровне при существенном улучшении условий труда.

В ОАО «БЕЛНИИЛИТ» разработаны малоотходная технология и современное автоматизированное оборудование для получения литых заготовок гильз цилиндров в облицованные кокили. Металл заливают в облицованные песчано-смоляной смесью многоместные кокили с вертикальным разъемом. Технологический процесс обеспечивает значительную экономию металла за счет снижения массы заготовки, сокращения количества литейного брака. Отливки имеют небольшие припуски на механическую обработку (от 1,5 до 2,5 мм), коэффициент использования металла составляет 0,6–0,7. По сравнению с литьем в песчаные формы на автоматических формовочных линиях выигрыш по массе заготовки незначительный, однако снижается расход чугуна на литейную систему, так как масса литниковой системы не превышает 20% от массы отливки. Технология литья в облицованный кокиль по сравнению с другими способами позволяет получать отливки более высокой размерной точности, потому что она обеспечивается стабильностью размеров

кокилей, защищенных от расплава слоем облицовки. Учитывая реальные потери от брака при механической обработке, преимущества литья в облицованный кокиль становятся еще более значительными. Многолетняя практика получения заготовок позволила определить оптимальные технологические параметры процесса, усовершенствовать используемое оборудование, провести комплекс мероприятий по автоматизации процесса.

Совершенствование и разработка комплексной ресурсосберегающей технологии литья затрагивает все стадии изготовления, начиная от теоретического анализа процесса формирования заготовок в характерных для способа условиях до чисто практических вопросов, связанных с использованием процесса в производстве. Основные требования, предъявляемые к отливкам гильз цилиндров, можно обеспечить за счет использования оптимальных составов чугунов применительно к данной технологии литья, рациональной технологии плавки, внепечной обработки, управления процессами структурообразования.

В практике мирового двигателестроения для изготовления гильз цилиндров наибольшее применение нашли экономнолегированные (Cr, Ni, Cu, Mo, P, Ti и т. д. в различных сочетаниях) чугуны с перлитной, бейнито-мартенситной или аустенитной матрицей.

На формирование металлической матрицы оказывают влияние химический состав чугуна, эффективность процесса модифицирования, скорость кристаллизации и охлаждения заготовки. Совместное влияние этих факторов определяет конечную структуру чугуна, а следовательно, физико-механические и эксплуатационные свойства деталей. Вследствие большого перепада температур между формой и жидким металлом скорость кристаллизации в начальный период формирования высокая, по мере охлаждения отливки происходит разогрев формы, интенсивность теплообмена падает. Для получения оптимальной формы и размеров графита требуется медленное охлаждение заготовки в области эвтектических температур. Повышенные скорости охлаждения до температур перлитного превращения позволяют получать мелкодисперсную структуру металлической матрицы. Скорость затвердевания и охлаждения заготовки зависит от теплофизических свойств заливаемого металла и литейной формы, а также геометрических размеров заготовки.

Практический опыт получения отливок свидетельствует об исключительно важной роли тепловых условий формирования отливки, происходя-

щих в облицованных кокилях на стадии разлива и затвердевания и охлаждения отливки. Выбор оптимальных технологических параметров процесса, а также определение факторов, оказывающих наиболее сильное влияние на процесс формирования и качество получаемых заготовок, необходимо проводить на начальной стадии освоения технологии.

В [1] разработана математическая модель процесса формирования отливок гильз цилиндров в облицованный кокиль. На примере плоской пластины, независимо от конфигурации отливки, принимая при этом постоянную температуру кокиля в течение цикла литья, проведен анализ влияния технологических параметров процесса на кинетику процесса затвердевания отливки гильзы. Возможности специалистов в области математического моделирования технологического процесса в тот период внедрения и освоения процесса были достаточно ограничены.

Современное развитие компьютерной техники позволяет на более высоком уровне определить влияние значительно большего количества технологических параметров на качество получаемых заготовок с учетом геометрических размеров отливки и формы.

Программы компьютерного моделирования, основанные на физических теориях тепловых, диффузионных, гидродинамических и деформационных явлений (ProCAST, Полигон и др.), при решении большинства практических задач способны адекватно моделировать сложные физические процессы, происходящие при заполнении расплавом формы, кристаллизации сплава и его дальнейшего охлаждения. Однако в ряде случаев получение адекватного результата компьютерного моделирования является затруднительным по причине задания неверных теплофизических параметров, таких, как температуры фазовых превращений и объемная доля твердой фазы, выделяющаяся в интервале кристаллизации сплава.

Решение задач затвердевания отливок с учетом выделившейся теплоты кристаллизации сплава осуществляется с использованием уравнения теплопроводности:

$$\rho \tilde{n} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T), \quad (1)$$

где  $c$ ,  $\rho$  – соответственно теплоемкость и плотность сплава;  $L$  – удельная теплота кристаллизации сплава;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $f_s$  – количество выделившейся твердой фазы в интервале кристаллизации;  $T$  – температура;  $t$  – время.

Для решения задачи в системах компьютерного моделирования литейных процессов широко применяют так называемые термодинамические калькуляторы с использованием методов обработки данных равновесных фазовых диаграмм, в частности «правила рычага»:

$$f_s = \frac{C_L - C_0}{C_L - C_S}, \quad (2)$$

где  $C_0$ ,  $C_L$ ,  $C_S$  – соответственно концентрации компонента в исходном сплаве, жидкой и твердой фазах.

Также широко для расчетов выделившейся твердой фазы применяют уравнение Шейла:

$$f_s = \left( \frac{1}{1-k} \right) \left( \frac{C_S - kC_0}{C_S} \right), \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент распределения ( $k = C_S/C_L$ ).

Однако данные, полученные с использованием равновесных диаграмм состояния, во многих случаях не отражают реальный характер затвердевания отливок. Динамика процессов формирования структуры отливок в условиях неравновесного затвердевания, применение модифицирования и рафинирования, использование вторичных материалов для производства отливок, разнообразие составов литейных сплавов и особенностей технологических процессов их получения приводят к большим погрешностям при использовании термодинамических калькуляторов для практических расчетов. Единственно возможным методом получения достоверных значений выделившейся твердой фазы и теплофизических свойств сплавов для моделирования литейных процессов остается получение экспериментальных данных.

На практике для решения этой задачи широко используется метод компьютерного термического анализа (КТА) пробы расплава, который в настоящее время находится в стадии активной разработки и совершенствования [2]. В настоящей работе для определения объемной доли твердой фракции авторы использовали математическую модель, полученную из уравнения теплового баланса для системы «отливка – окружающая среда»:

$$\frac{dQ}{dt} - mc_p \frac{dT}{dt} = \alpha F(T - T_0), \quad (4)$$

где  $m$  – масса отливки (образца);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $F$  – площадь поверхности образца;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $Q$  – теплота затвердевания сплава ( $dQ/dt = Ldm_s/dt$ );  $m_s$  – масса выделившейся твердой фазы.

Учитывая, что до начала и после окончания кристаллизации ( $t < t_L$ ,  $t > t_S$ )  $dQ/dt = 0$ , можно записать:

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{-mc \frac{dT}{dt}}{F\Delta T(t)}, & t < t_L, \quad t > t_S, \\ \frac{L \frac{dm_S}{dt} - mc \frac{dT}{dt}}{F\Delta T(t)}, & t_L < t < t_S. \end{cases} \quad (5)$$

В [3] показано, что при условии  $dT/dt = d\Delta T/dt$  (в силу  $T_0 = \text{const}$ ) уравнение (4) приводится к виду

$$\frac{d\Delta T(t)}{dt} + \delta(t)\Delta T(t) = \varphi(t), \quad (6)$$

где

$$\delta(t) = \frac{\alpha(t)F}{cm}; \quad \varphi(t) = \frac{L}{cm} \frac{dm_S}{dt}. \quad (7)$$

Из уравнений (6)–(7) с учетом того, что  $f_S = m_S/m$ , можно определить изменение количества выделившейся твердой фазы:

$$\frac{df_S}{dt} = \frac{c}{L} \left[ \frac{d\Delta T(t)}{dt} + \delta(t)\Delta T(t) \right]. \quad (8)$$

Математическая модель для определения объемной доли выделившейся твердой фазы записывается в виде

$$f_S(t) = \frac{c}{L} \left[ (\Delta T(t) - \Delta T_0) + \int_0^t \delta(\tau)\Delta T(\tau)d\tau \right]. \quad (9)$$

Так как решением уравнения (6) при  $\delta = \text{const}$  для однофазных участков кривой охлаждения является уравнение вида [1]:

$$\Delta T(t) = \Delta T_0 e^{-\delta t}, \quad (10)$$

параметр  $\delta$  легко определяется из уравнения (10).

В качестве объекта исследований выбрана отливка гильзы ГАЗ-66 ( $d_{\text{н}} = 121$  мм,  $d_{\text{вн}} = 85$  мм,  $h = 162,5$  мм), производимая на Лидском литейно-механическом заводе способом литья в облицованный кокиль. Для определения особенностей тепловых условий литья в облицованный кокиль

результаты расчетов сравнивали с затвердеванием двойной заготовки гильзы цилиндров, получаемых центробежным способом литья.

На рис. 1 показаны отливки с литниковой системой. Химический состав чугуна (%): С – 3,3–3,7; Mn – 0,5–0,7; Si – 2,2–2,6; P – 0,3–0,45; Cu – 0,5–0,8; Cr – 0,3–0,5; Ni – 0,15–0,5; V – 0,08–0,15; Ti – 0,05–0,15; В – 0,02–0,05.

Математическое моделирование осуществляли в системе ProCAST. На первом этапе изучали влияние толщины облицовки на процесс формирования заготовки. Теоретический анализ проводили при граничных условиях третьего рода. В зависимости от начальных условий коэффициент теплопередачи принимали от 500 до 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

На рис. 2 показано изменение количества твердой фазы во времени в зависимости от толщины облицовки при литье в облицованный кокиль и при центробежном способе литья. Анализ численных исследований показывает, что при уменьшении толщины облицовки с 7 до 3 мм (температура облицовки  $T_0 = 150$  °С, температура кокиля  $T_{\text{к}} = 200$  °С, температура заливаемого металла  $T_{\text{м}} = 1320$  °С) скорость затвердевания заготовки возрастает от 0,1 до 0,13 мм/с. Время полного затвердевания заготовки при толщине облицованного слоя 3, 5 и 7 мм составляет 78, 96 и 99 с соответственно. Для центробежного способа литья скорость затвердевания заготовки в сходственных сечениях составляет ~0,035 мм/с. Толщина облицовки оказывает заметное влияние не только на скорость затвердевания отливки, но и на изменение температуры металлического кокиля под облицованным слоем. При толщине облицовки свыше 7 мм температура массивного кокиля при литье изменяется незначительно. На установках, разработанных в ОАО «БЕЛНИИЛИТ» в условиях Лидского литейно-механического завода, процесс литья в облицованный кокиль осущест-



Рис. 1. Отливки с литниковой системой: а – литье в облицованный кокиль; б – двойная заготовка гильзы, получаемая центробежным способом литья

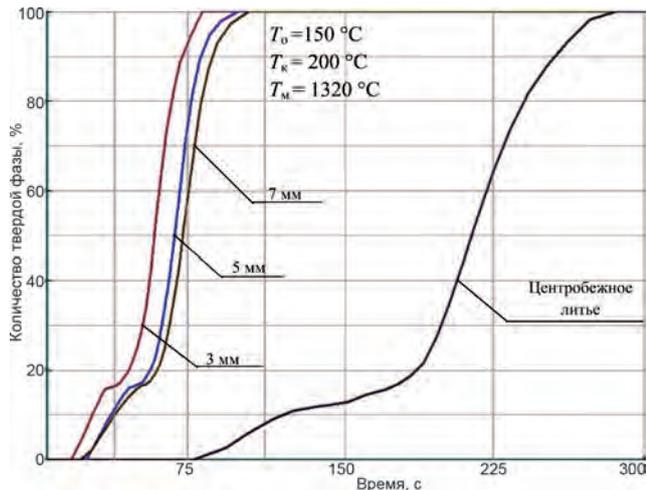


Рис. 2. Влияние толщины облицовки на скорость затвердевания заготовки

влияют при толщине облицовки 5 мм. При определении оптимальной толщины облицовки принимали во внимание не только получение качественной заготовки, но и стойкость кокильной оснастки, экологические аспекты технологии.

Как показали дальнейшие расчеты, толщина облицовки оказывает наибольшее влияние на скорость затвердевания заготовки, влияние температуры облицовки и температуры заливаемого металла носит второстепенный характер. Так, например, при увеличении температуры облицовки  $T_K$  от 150 до 200 °C ( $T_M = 1320\text{ }^\circ\text{C}$ ) скорость затвердевания падает с 0,13 до 0,075 мм/с ( $\delta = 3\text{ мм}$ ), для толщины облицовки  $\delta = 7\text{ мм}$  – с 0,1 до 0,05 мм/с соответственно. При увеличении температуры заливаемого металла от 1320 до 1400 °C ( $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ ) для толщины облицовки  $\delta = 3\text{ мм}$  скорость затвердевания падает с 0,13 до 0,08 мм/с, для толщины облицовки  $\delta = 7\text{ мм}$  – с 0,1 до 0,05 мм/с. Влияние толщины облицовки на скорость затвердевания в исследованных диапазонах изменения технологических параметров составляет 77%, влияние температуры заливаемого металла и температуры облицовки – 50–60%.

Наибольший интерес представляют данные теоретического анализа о возможности образова-

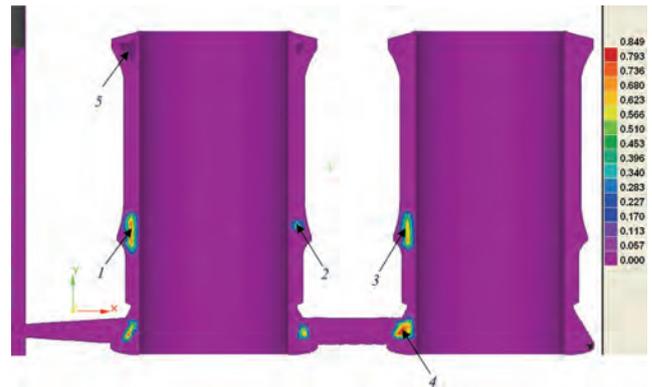


Рис. 3. Возможные зоны образования пористости: 1–5 – зоны отливки

ния пористости в различных точках отливки в зависимости от технологических параметров литья. На рис. 3 показаны места возможного образования пористости при литье в облицованный кокиль, а в таблице – вероятность образования пористости в отливках в зависимости от температуры заливаемого металла, температуры кокиля и облицовки. Наиболее наглядно влияние толщины облицовки на вероятность образования пористости видно при температуре заливаемого металла 1400 °C.

Пористость оказывает негативное воздействие на циклическую прочность, а, следовательно, и на эксплуатационные свойства гильз цилиндров. Вероятность возрастания пористости падает с увеличением скорости затвердевания и возрастает с увеличением температуры заливаемого металла и температуры облицовки. Многолетняя практика эксплуатации технологического процесса литья в облицованный кокиль свидетельствует о том, что процесс очень чувствителен к изменению технологических параметров, достаточно сложный в регулировании и контроле.

Современные системы моделирования позволяют не только определить влияние технологических параметров на процесс формирования заготовки, но и предсказать твердость, а следовательно, и микроструктуру в различных сечениях получаемой заготовки. Известно, что ProCAST

**Вероятность образования пористости в зависимости от технологических параметров литья**

Параметры	Вероятность образования усадочной пористости в узлах, %				
	1	2	3	4	5
$T_M = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 3\text{ мм}$	69	40	62	80	100
$T_M = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 5\text{ мм}$	73	42	65	81,9	100
$T_M = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 7\text{ мм}$	75	44	66	84	100
$T_M = 1320\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 5\text{ мм}$	70	10	61,8	81	100
$T_M = 1320\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 225\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 175\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 5\text{ мм}$	71,2	17	64	81,5	100
$T_M = 1320\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 250\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 5\text{ мм}$	72,7	20	65,9	83	100
$T_M = 1360\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_K = 200\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 5\text{ мм}$	73,5	16	66	81,1	100

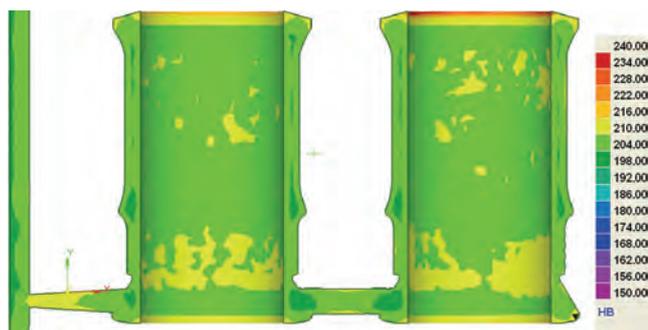


Рис. 4. Изменение твердости по сечению заготовки

позволяет прогнозировать микроструктуру большинства многокомпонентных промышленных сплавов с использованием модели, объединяющей макроанализ процесса теплопереноса во всех частях отливки с зарождением и ростом зерна.

При изготовлении гильз цилиндров широко используется чугун ИЧГ-33М, разработанный применительно к центробежному способу литья. Чугун по химическому составу имеет более высокое содержание хрома (0,5–0,75%). Первые попытки использования данного чугуна на Лидском литейно-механическом заводе при литье в облицованный кокиль дали негативные результаты по причине завышенной твердости. На протяжении достаточно длительного времени в условиях завода проводили корректировку химического состава чугуна применительно к технологическому процессу литья в облицованный кокиль. Учитывая более высокие скорости затвердевания и охлаждения, характерные для литья в облицованный кокиль, происходило увеличение твердости, в первую очередь по торцам заготовок. Проведенный численный анализ свидетельствует о том, что с увеличенным содержанием хрома твердость в верхней части отливки возрастает от 228–240 до 255–270 НВ.

На рис. 4 приведены данные по изменению твердости заготовок при температуре заливаемого металла 1320 °С и толщине облицовки 5 мм ( $T_0 = 175$  °С).

Одним из важных факторов, оказывающих влияние на качество получаемых заготовок, является размерная стабильность кокильной оснастки. Несмотря на то что облицовочный слой значительно снижает термическую нагрузку на кокиль, возникающие термические напряжения ведут к короблению кокиля. В системе моделирования ProCAST возможен расчет остаточных напряжений, пластических деформаций по специальному контактному алгоритму, обеспечивающему анализ контакта между отливкой и формой с последующим графическим выводом результатов.

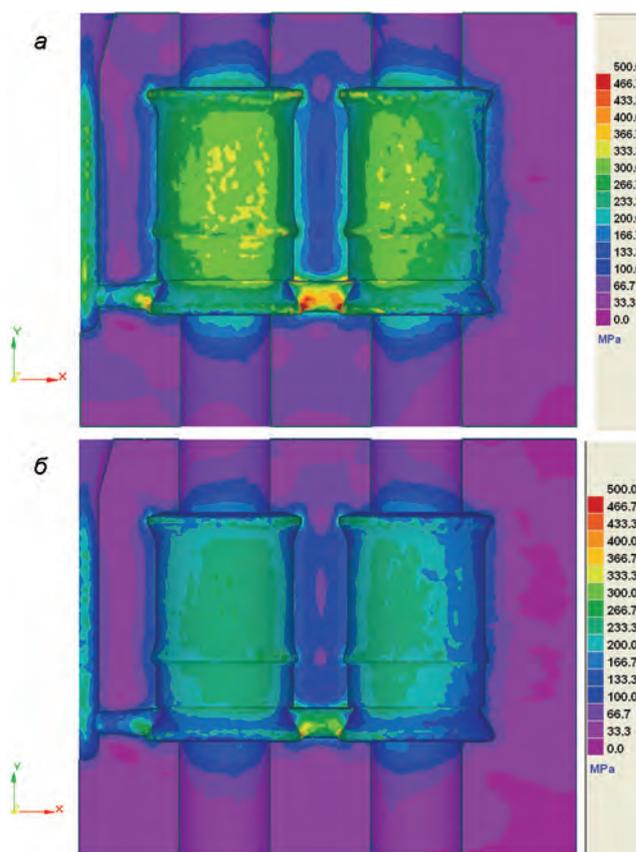


Рис. 5. Уровень напряжений в сером чугуне (а) и ферритном чугуне с вермикулярной формой графита (б)

В настоящее время кокиль изготавливают из серого чугуна СЧ20. Наиболее оптимальным материалом для изготовления кокиля является ферритный чугун с вермикулярной формой графита, так как он имеет меньшую склонность к окислению и росту, короблению при повышенных температурах. Серый чугун в условиях работы, характерных для кокильной оснастки, из-за более быстрого внутреннего окисления вдоль пластин графита менее стойкий в сопротивлении к зарождению и развитию термоусталостных трещин. Распад перлита ведет к увеличению размеров до 1,5% и значительно ускоряется с ростом температуры под воздействием динамических нагрузок. Рост чугуна, который большей частью является результатом изменения структуры, может быть существенным фактором, влияющим на величину термических напряжений. Вермикулярная форма графита по сравнению с пластинчатой формой обеспечивает в чугунах повышение сопротивления термической усталости на 25–40%. В ферритном чугуне с вермикулярной формой графита возникновение и развитие трещин происходит значительно медленнее, чем в перлитном, что обусловлено как температурной стабильностью ферритной матрицы, так и высокой ее пластичностью. На рис. 5 приведены результаты рас-

чета напряжений в кокильной оснастке для серого чугуна с пластинчатой формой графита и ферритного чугуна с вермикулярной формой графита.

Результаты расчета свидетельствуют о том, что уровень напряжений в кокиле, изготовленном из серого чугуна пластинчатой формы графита, приблизительно на 100 МПа больше, чем при использовании кокильной оснастки, изготовленной из ферритного чугуна с вермикулярной формой графита. В связи с этим эксплуатационную стойкость кокильной оснастки в условиях Лидского литейно-механического завода можно существенно повысить.

Представленный анализ состояния вопроса охватывает некоторые аспекты технологического процесса изготовления заготовок гильз цилиндров в облицованный кокиль. В связи с постоянным совершенствованием существующей технологии, разработкой принципиально новых способов изготовления заготовок гильз цилиндров расчет оптимальных технологических параметров с помощью специализированных программ моделирования литейных процессов позволяет получить значительную экономию времени и материальных ресурсов на стадии проектирования и начальной проработки технологических решений.

### Литература

1. Ш и ш к и н А. Е. Разработка ресурсосберегающей технологии литья автотракторных двигателей в облицованный кокиль: Дис. ... канд. техн. наук. Мн., 1992.
2. Rafalski I., Arabey A., Lushchik P., Chaus A. S. Computer modeling of cast alloys solidification by Computer-Aided Cooling Curve Analysis (CA-CCA) // International Doctoral Seminar, Proceedings. Trnava: AlumniPress, 2009. P. 291–301.
3. Б я л и к О. М., М е н т к о в с к и й Ю. Л. Вопросы динамической теории затвердевания металлических отливок. Киев: Вища шк., 1983.