

Литература

1. Белов, В.Д. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих технологий производства высококачественных отливок из алюминиевых сплавов : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.16.04 / В.Д.Белов ; МИСиС. – М., 1999. – 50 с.
2. Волочко, А.Т. Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий / А.Т. Волочко, М.А. Садоха. – Минск : Бел. наука, 2011. – 387 с.
3. Шмитц, К. Рециклинг алюминия. Справочное руководство / К. Шмитц, Й. Домагала, П. Хааг. – М. : «Алюсил МВиТ», 2008. – 528 с.
4. Повышение качества алюминиевых сплавов, выплавляемых в индукционных тигельных печах / А.В. Свидо [и др.] // Литейное производство. – 1984. – № 2. – С.26–27.
5. Особенности формирования крупных включений при индукционной плавке алюминиевых сплавов / А.С.Кауфман [и др.] // Литейное производство. – 1984. – № 3. – С. 13–14.
6. Гогин, В.Б. Современные направления развития технологии рециклинга алюминия (по материалам 3-й конференции «Рециклинг алюминия», Москва, 29–31 мая 2006 г.) / В.Б. Гогин, Д.А. Шадаев // Технология легких сплавов. – 2006. – № 4. – С. 101–118.

УДК 621.74.043:669.746.021

А.А. ПИВОВАРЧИК, канд. техн. наук,
А.М. МИХАЛЬЦОВ, канд. техн. наук,
Г.В. ДОВНАР, канд. техн. наук (БНТУ)

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Режим работы пресс-формы и машины литья под давлением (ЛПД) в целом в значительной степени определяется термосиловым взаимодействием затвердевающей отливки с формой. В случае, ко-

гда пресс-форма не имеет стержней, а содержит только охватывающие поверхности, усадка в отливке протекает свободно, напряжения не возникают, и отливка удаляется свободно, без образования задиrow [1, 2].

На практике отливка, как правило, содержит всевозможные внутренние полости и отверстия, которые выполняются с помощью металлических стержней. На поверхности соприкосновения отливки и стержня возникают контактные напряжения, вызывающие появление сил трения при извлечении отливки. Их величина в первую очередь будет зависеть от следующих факторов: времени выдержки отливки в форме, температуры формы и заливаемого металла, удельного давления прессования, размеров отливки (толщина стенки, высота), скорости впуска металла и скорости прессования, конусности стержней, шероховатости поверхности оснастки, характера и свойств смазочного слоя, образовавшегося после нанесения смазки.

Экспериментальное определение влияния указанных факторов на величину усилия извлечения требует больших материальных и временных затрат.

Целью настоящей работы является анализ существующих математических моделей для определения усилий съема отливок со стержня при литье под давлением.

Разработкой практических номограмм и расчетных формул при изучении влияния различных параметров процесса ЛПД на усилие обжатия стержня отливкой или извлечения стержня из отливки занимаются ученые уже более 65 лет. Одними из первых, кто экспериментально установил зависимость значения усилия удаления металлического стержня из отливки от различных факторов, были немецкий исследователь Цейс и советский ученый Н.П. Дубинин [3]. Еще в 60-е годы прошлого столетия Цейсом была разработана диаграмма, связывающая силу вытягивания (удаления) стержней различного диаметра и длиной 10 мм из затвердевшей отливки. Н.П. Дубинин предложил для практического использования графические зависимости, связывающие удельные усилия обжатия стального стержня круглого сечения с толщиной стенки отливки, температурой извлечения стержня и его конусностью.

Примерно в то же время стали появляться первые математические зависимости, позволяющие рассчитать усилие обжатия стерж-

ней. Усилие, необходимое для снятия отливки со стержней круглого сечения, П.П. Москвин [4] предложил определять по формуле:

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot p (\mu \cdot \cos \alpha - \sin \alpha), \quad (1)$$

где d – диаметр стержня, м; h – высота стержня, м; p – усилие обжатия, зависящее от температуры формы и отливки, от толщины ее стенок и состава сплава (принимают равным 10–20 МПа); α – линейный уклон стержня, °; μ – коэффициент трения между отливкой и стержнем (0,2–0,25 для алюминиевых сплавов).

В работе [5] показано, что усилие извлечения стержня из отливки приближается к пределу текучести материала отливки и зависит от ее сечения. Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$P \leq K \sigma_T, \quad (2)$$

где K – сечение заготовки, м²; σ_T – предел текучести материала отливки, МПа.

Вероятно, автор ошибочно связывает усилие, затрачиваемое на удаление стержня из отливки, с площадью сечения стержня, а не с его боковой поверхностью, как это рассматривается в формулах других исследователей.

В формуле, предложенной И.П. Фоминым [6], наиболее полно учитываются факторы, влияющие на удаление стержня из отливки. Усилие извлечения стержня из отливки предлагается определять по следующей формуле:

$$P = 2\pi \cdot k \cdot F \cdot \sigma_T (\mu - \operatorname{tg} \alpha), \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий трение в подвижных частях машины, приваривание отливки к форме, затруднение выталкивания, связанное с появлением трещин разгара на стержне и вставках пресс-формы; F – площадь контакта отливки и стержня, м²; σ_T – предел текучести сплава, МПа.

В этой же работе отмечается, что величина σ_T и μ должны определяться опытным путем с учетом температурного режима работы пресс-формы. Поскольку на тот период времени таких данных получено не было, тяговое усилие извлечения стержня определялось экспериментальным путем.

П.И. Пушмашёв и А.М. Зубакин в работе [7] предлагают определять усилие извлечения стержня по формуле, учитывающей модуль упругости материала отливки:

$$P = \frac{4\pi \cdot \lambda \cdot E \cdot L_{\text{ст}}(R-r)r \cdot f_{\text{тр}} \Delta t \cos \beta}{R+r}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент линейного расширения сплава, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости материала отливки, МПа; $L_{\text{ст}}$ – рабочая длина стержня, м; R, r – наружный и внутренний радиус отливки соответственно, м; Δt – вариация температуры, $^\circ\text{C}$; $\cos \beta$ – уклон стержня, град.

В.Н. Зеленов [2] рекомендует рассчитывать усилие извлечения стержня из отливки по формуле:

$$P = f_{\text{тр}} \frac{H \cdot \lambda \cdot E (T_{\text{кр}} - T_{\text{уд}})}{R_{\text{ст}}} F, \quad (5)$$

где H – толщина отливки, м; $T_{\text{кр}}$ – температура кристаллизации отливки, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{уд}}$ – температура удаления отливки из пресс-формы, $^\circ\text{C}$; $R_{\text{ст}}$ – радиус стержня, м.

В работе [8] для вычисления усилия, необходимого для преодоления сил трения между отливкой и металлическим стержнем без учета разделительного покрытия, автор использует следующую формулу:

$$P = f_{\text{тр}} S_0 \frac{\sigma_{\text{т}}}{\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где S_0 – площадь поверхности отливки, м^2 ; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести сплава при его сжатии при различных температурах, МПа.

В работе [9] формула для определения усилия извлечения имеет вид:

$$P = f_{\text{тр}} P_{\text{ст}} F, \quad (7)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения между отливкой и стержнем; $P_{\text{ст}}$ – давление отливки на стержень, Н.

Однако каким образом рассчитывается $P_{ст}$ автор не указывает.

Усилие извлечения стержня из отливки в работе [10] определяют по формуле:

$$P = F \cdot f_{тр} \frac{T_{кр} - T_{ф}}{T_{уд}} \cdot \frac{2L_{ст}R_{ст}\delta_{отл}}{(2R_{ст} + \delta_{отл})^3}, \quad (8)$$

где $T_{ф}$ – температура формы, °C; $L_{ст}$ – рабочая длина стержня, м; $\delta_{отл}$ – толщина отливки, м.

Данная формула, вероятно, представлена с искажением, поскольку все размерности представленных величин сокращаются. Поиск информации в указанном первоисточнике [11] не дал результатов, так как в нем отсутствует приведенная формула.

Усилие извлечения стержня из отливки Л.П. Каширцев в работе [12] предлагает определять по формуле:

$$P = k_k P_{уд} S_0 k_n, \quad (9)$$

где k_k – поправочный коэффициент, определяемый в зависимости от конфигурации и размеров простейшей отливки (1,0–1,8); $P_{уд}$ – удельная сила извлечения круглого металлического стержня из отливки типа втулка, Н; S_0 – площадь контакта отливки со стержнем, м²; k_n – коэффициент, учитывающий наличие доньшка (1,0–1,3).

Удельная сила извлечения приблизительно может быть определена по номограмме Н.П. Дубинина [3] для расчета кокилей с учетом коэффициента трения, толщины стенки отливки, температуры стержня в момент извлечения, температуры отливки, начальной температуры кокиля, толщины стенки кокиля.

Анализ представленных уравнений показывает, что для расчета усилия извлечения металлического стержня из затвердевающей отливки необходимо рассчитать или получить с использованием специальных номограмм значение давления отливки на стержень, а также иметь данные по коэффициенту трения на границе «стержень – отливка».

Принятые для расчетов значения некоторых параметров, приведенные выше расчетные формулы и полученные по ним результаты расчетов представлены в таблице 1. Существенное различие результатов обусловлено, по-видимому, степенью учета влияния наиболее значимых факторов.

Таблица 1 — Результаты вычисления усилия извлечения стержня из отливки по различным моделям

Принятые значения	Расчетная формула	Номер формулы	Литературный источник	Результаты вычислений, Н	Примечание	
<p> $d = 0,01$ м; $L_{\text{ср}} = 0,04$ м; $\alpha, \beta = 1^\circ$; $T_{\text{сп}} = 573$ °С; $T_{\text{ф}} = 220$ °С; $T_{\text{уд}} = 371$ °С; $F, S_0 = 0,001335$ м²; $\sigma_{\text{т}} = 28$ МПа; $k_{\text{к}} = 1,0$; $k_{\text{н}} = 1,0$; $\Delta T = 202$ °С; $E = 7\ 000$ МПа; $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; $r = 0,01$ м; $R = 0,03$ м; $f_{\text{тп}} = 0,25$ </p>	$P = \pi d h r (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)$	(1)	[4]	2895,0 5790,0		
	$P = 2\pi k f \sigma_{\text{т}} r (\mu - \text{tg } \alpha)$	(3)	[6]	9222,1		
	$P = \frac{4\pi\lambda E L_{\text{ср}} (R-r) f_{\text{тп}} \Delta T \cos \beta}{R+r}$	(4)	[7]	8834,6		
	$P = f_{\text{тп}} \frac{H\lambda E (T_{\text{сп}} - T_{\text{уд}})}{R_{\text{ср}}} F$	(5)	[2]	15762,0		
	$P = f_{\text{тп}} S_0 \frac{\sigma_{\text{т}}}{\sqrt{3}}$	(6)	[8]	4051,0		
	$P = f_{\text{тп}} P_{\text{ср}} F$	(7)	[9]	5840,6		
	$P = k_{\text{к}} P_{\text{уд}} S_0 k_{\text{н}}$	(9)	[12]	4604,5		
						$P_{\text{уд}}$ определяем по диаграмме Дубинина [3]

Для экспериментальной оценки предлагаемых различных математических моделей, предназначенных для расчета P , была проведена серия опытов по методике, представленной в работе [13].

Как следует из представленных в таблице 1 результатов, значения усилия извлечения стержня из отливки лежат в интервале от 2895 до 15762 Н. Столь значительное расхождение в расчетах, по-видимому, связано с тем, что авторы неверно оценивают величину напряженного состояния материала отливки в момент удаления стержня.

Учитывая полученные результаты, формула (6) была взята за основу определения усилия извлечения стержня при использовании различных разделительных покрытий, для которых имеются литературные данные по динамической характеристике коэффициента трения, так как позволяет наиболее точно оценить величину касательных напряжений на границе раздела «отливка–стержень». Данные расчетов и испытаний по вышеупомянутой методике приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов и экспериментальные значения усилия извлечения стержня из отливки

Составы смазок	Динамические характеристики коэффициента трения, [2]	Усилие извлечения стержня, Н	
		Расчетные значения	Экспериментальные значения
На основе гидрофобизатора ГФК-1	0,47	7616,3	1460
На основе масла Вапор	0,33	5347,6	1150
На основе горного воска	0,23	3727,1	760
Смазка «Петрофер», Германия	0,2	3241,0	690
На основе полиметилсилоксановой жидкости	0,16	2592,8	680

Как следует из таблицы 2, расчетные значения усилия извлечения стержня из отливки для всех исследуемых смазок оказались в 4–5 раз больше экспериментальных. Дальнейший анализ системы «отливка–стержень» показал, что расхождение экспериментальных и практических данных может быть объяснено неточным определением коэффициента трения между трущимися поверхностями, а также неверной оценкой фактической площади контакта на границе раздела двух тел.

Литература

1. **Зеленов, В.Н.** Смазка пресс-форм / В.Н. Зеленов // Совершенствование технологии и организации производства литья под давлением : материалы семинара. – М. : Наука, 1980. – С. 72–78.
2. **Зеленов, В.Н.** Смазка пресс-форм литья под давлением / В.Н. Зеленов, Л.Е. Киселенко. – М.: Машиностроение, 1983. – 144 с.
3. **Дубинин, Н.П.** Механизация и автоматизация литья в металлические формы / Н.П. Дубинин. – М. : Машгиз. – 1959. – 393 с.
4. **Москвин, П.И.** Литье в постоянные формы / П.И. Москвин. – М.: Машиностроение, 1961. – 425 с.
5. **Пляцкий, В.М.** Штамповка из жидкого металла / В.М. Пляцкий. – М. ; – Л. : Машиностроение, 1964. – 316 с.
6. **Фоминых, И.П.** Расчет усилия извлечения стержней из отливок при литье под давлением / И.П. Фоминых. – Тула : – Приокское книжное издательство, 1969. – 56 с.
7. **Пушмашёв, П.И.** Определение усилия извлечения стержня из отливки, получаемой литьем под давлением / П.И. Пушмашёв // Литейное производство. – 1975. – № 12. – С. 22–23.
8. **Брежнев, Л.В.** Формирование отливок при литье с кристаллизацией под давлением / Л.В. Брежнев // Литейное производство. – 2002. – № 2. – С.16–17.
9. **Беккер, М.Б.** Литье под давлением / М.Б. Беккер, М.Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
10. **Ефимов, В.А.** Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
11. **Белопухов, А.К.** Технологические режимы литья под давлением / А.К. Белопухов. – М. : Машиностроение, 1985. – 272 с.

12. Каширцев, Л.П. Литейные машины. Литье в металлические формы: учебное пособие / Л.П. Каширцев. – М. : Машиностроение, 2005. – 368 с.

13. Михальцов, А.М. Разработка вододисперсионных смазок для пресс-форм литья под давлением / А.М. Михальцов, А.А. Пивоварчик, В.А. Розум // Литейное производство. – 2006 – № 3. – С. 15–16.

УДК 621.74.043.2+621.7.079

А.М. МИХАЛЬЦОВ, канд. техн. наук,
А.А. ПИВОВАРЧИК, канд. техн. наук (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПРЕСС-ФОРМ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Введение. Одной из причин высокого газосодержания отливок при литье под давлением является газовыделение покрытий, наносимых на рабочую поверхность пресс-форм перед запрессовкой металла [1–3].

Покрытия для механизированного нанесения обычно состоят из основы, растворителя (разбавителя), поверхностно-активных веществ и различных специальных присадок. В качестве основы используются масла, жиры, кремнийорганические материалы, графит (преимущественно в виде коллоидных препаратов); реже применяются соли. После нанесения покрытия растворитель испаряется, а на поверхности пресс-формы остается тонкая экранирующая пленка [4].

Газотворность покрытий определяется в основном газотворностью основы разделительного покрытия. Поэтому при выборе основы необходимо учитывать ее влияние не только на усилие извлечения отливки из пресс-формы или стержней из отливки, но и на газовый режим формы, а, следовательно, на пористость в отливках.

Целью данной работы является определение газотворной способности разделительных покрытий для литья алюминиевых сплавов под давлением.