

М249468

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

РЫЖКОВ Николай Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ТОНКОСТЕННЫХ ФАСОННЫХ ОТЛИВОК
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ВСАСЫВАНИЯ

(Специальность № 05.16.04 — «Литейное производство»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НЕ НАДО
ВЫДАЕТСЯ



1249468

Рыжков Н. Ф. Исследование

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана и на Барнаульском заводе транспортного машиностроения.

Научный руководитель —
к. т. н., доцент Э. Ч. ГИНИ

Официальные оппоненты:
д. т. н., профессор Б. В. РАБИНОВИЧ,
к. т. н., доцент Ю. П. ЯКОВЛЕВ

Ведущее предприятие — Московский завод «ПРОЖЕКТОР».

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1975 г.
на заседании Совета факультета «Автоматизация и механизация производства» Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Б-5, 2-я

заверенные печатью,

ся в библиотеке учи-

Степанов Ю. А.

M249468

М 249 468

Снижение веса заготовок и трудоемкости изготовления с одновременным улучшением их качества - задачи, поставленные партией и правительством перед литейным производством. Значительным вкладом в решение этих задач является широкое внедрение в производство новых прогрессивных технологических процессов, к которым относится и литье методом вакуумного всасывания (ЛВВ).

Литье методом вакуумного всасывания для изготовления определенного класса отливок имеет преимущества по сравнению с другими видами литья. Этот метод особенно эффективен для изготовления тонкостенных сложных отливок с развитой поверхностью из алюминиевых сплавов. При этом хорошо выполняются участки отливок с острыми углами и тонкими ребрами. Эти преимущества были сформулированы его авторами акад. А.А. Бочваром и А.Г. Спасским. Однако из-за недостаточной изученности процесса, при изготовлении тонкостенных отливок, он не нашел еще должного распространения. Отсутствие систематизированных данных о влиянии различных параметров на характер заполнения полости формы сплавом и появление в связи с этим разного рода дефектов отливок не дает возможности конструкторам и технологам производить правильный выбор параметров процесса, с целью получения качественных отливок и требует значительных экспериментальных работ при освоении каждой отливки.

В связи с этим и возрастающей потребностью заводов в отливках класса "крыльчатка", имеющих массивную ступицу и тонкостенные лопасти (1,0-2,5 мм) и предъявляемым к ним высоким требованиям по плотности металла, прочности и чистоте поверхности лопаток, в настоящей работе была поставлена задача теоретического и экспериментального исследования рабочего процесса установок ЛВВ, с целью создания методики для расчета конструктивных параметров установок и разработки технологического процесса изготовления подобных отливок.

Диссертационная работа, изложенная на 135 страницах машинописного текста с 9 таблицами и 75 рисунками, состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Список использованной литературы включает 65 наименований. В приложении приведены документы, иллюстрирующие использование в промышленности рекомендаций, вытекающих из проведенных исследований.

В первой главе, на основе литературных данных, приведены сведения о технологическом процессе литья методом вакуумного всасывания, видах брака отливок и причинах его возникновения. Сделан анализ существующих методов расчета технологических параметров

процесса.

Анализ этих материалов показал, что проведенные ранее исследования не позволяют правильно выбрать конструктивные и технологические параметры, с целью обеспечения необходимого характера заполнения полости формы. Из теоретических работ и практики литья под низким давлением (ЛНД), способа литья близкого по характеру процессу ЛВВ, следует, что при заполнении тонкостенных отливок пульсация потока сплава отрицательно сказывается на качестве отливок. По вопросу устранения подобных явлений имеются противоречивые мнения, так как порой они получены лишь аналитическим методом, без тщательной экспериментальной проверки.

Проведенный анализ литературных данных по литью методом вакуумного всасывания и под низким давлением позволил сформулировать основные задачи исследований:

1. Аналитически и экспериментально исследовать динамику рабочего процесса установок литья вакуумным всасыванием (ЛВВ).
2. Исследовать влияние пневмо-гидравлических и тепловых параметров на заполняемость и прочность отливок „крыльчатка” и исследовать влияние степени низкого давления воздуха, подаваемого на сплав в тигле, при кристаллизации отливки в форме, на плотность ее в массивной части, после заполнения формы вакуумным всасыванием.
3. Разработать рекомендации и предложить методику по расчету и регулированию пневмо-гидравлических и конструктивных параметров рабочего процесса установок ЛВВ, при изготовлении отливок класса „крыльчатка”.

Во второй главе изложено аналитическое исследование динамики рабочего процесса установок литья вакуумным всасыванием.

Анализ работы пневмосистем установок ЛВВ и пневмоприводов двустороннего действия, с переменной по ходу нагрузкой, показал, что по принципу действия их работа аналогична. Так же как и в пневмоприводах двустороннего действия в пневмосистеме установок ЛВВ различают две полости. Обе являются полостями опораживания или иначе полостями противодействия. Первую из них образует объем полости металлопровода и формы до заполнения их сплавом. Вторую — объем свободного пространства вакуум-камеры установки. Процесс истечения воздуха из первой, при движении сплава, происходит при переменных величинах разрежения и объема. Истечение из второй происходит при переменном разрежении и постоянном объеме.

К основным уравнениям динамики поршневого пневматического устройства относятся: а) уравнения, характеризующие процессы исте-

чения и изменения состояния воздуха в каждой полости (уравнения энергетического баланса); б) уравнение движения поршня.

Применительно к установкам литья вакуумным всасыванием система уравнений, в общем виде, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} -RT_{\varphi} d\theta_{\varphi} &= (F_n \cdot h_n + \sum_{i=1}^n F_{\varphi_i} h_{\varphi_i}) d\rho_{\varphi} - \kappa \rho_{\varphi} d(F_n h_n + \sum_{i=1}^n F_{\varphi_i} h_{\varphi_i}); \\ -RT_{\kappa} d\theta_{\kappa} + \kappa RT_{\varphi} d\theta_{\varphi} &= V_{\kappa} d\rho_{\kappa}; \\ M \frac{d^2 \chi}{dt^2} &= \sum P = P_{\text{рас}} - P_c, \end{aligned} \quad (I)$$

где $d\theta_{\varphi}$ - количество воздуха вытекающего из полости формы в камеру через вентиляционные каналы;

$d\theta_{\kappa}$ - то же самое из камеры в ресивер через дроссель;

χ - путь потока сплава;

$d\rho_{\varphi}$ - изменение разрежения воздуха в полости формы;

$d\rho_{\kappa}$ - то же самое в камере установки;

T_{φ} - температура воздуха в полости формы;

T_{κ} - то же самое в камере установки;

M - масса потока сплава;

$\sum P$ - сумма всех сил, действующих на сплав при его движении;

R - газовая постоянная;

P_c - силы сопротивления потоку сплава;

$P_{\text{рас}}$ - сила обеспечивающая движение сплава;

V_{κ} - объем свободного пространства вакуум-камеры;

F_n - площадь сечения металлопровода;

h_n - высота металлопровода;

F_{φ_i} - площадь сечения полости формы на i -ом участке;

h_{φ_i} - высота участков формы с постоянным для них сечением.

Второе уравнение системы (I) учитывает количество воздуха поступающее из полости формы и металлопровода в камеру в процессе заполнения их сплавом.

Масса потока сплава, в общем случае, является функцией пути. Применительно к установке ЛВВ она имеет вид:

$$M = F_{n,\varphi}(\chi) \cdot \chi \cdot \rho_n,$$

где $F_{n,\varphi}$ - площадь сечения канала для потока сплава;

ρ_n - плотность расплава при температуре всасывания.

Выражая количество воздуха через его расход G в интервал времени dt

$$d\theta = G dt,$$

а расход воздуха из полости формы G_{φ} в камеру и из камеры G_x в ресивер по

$$G_{\varphi, x} = \mu_{\delta(\varphi)} F_{\delta(\varphi)} \sqrt{\frac{2g\kappa P}{\kappa-1} \gamma \left[\left(\frac{P_{\delta(\varphi)}}{P_{\varphi(\kappa)}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{\delta(\varphi)}}{P_{\varphi(\kappa)}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]},$$

где $\mu_{\delta(\varphi)} = \frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma}}$ - коэффициент расхода пневмосистемы;

γ - коэффициент сопротивления пневмосистемы;

$F_{\delta(\varphi)}$ - площадь сечения вентиляционных каналов в форме (и соответственно дросселя),

систему уравнений (1) приводим к виду удобному для численного интегрирования

$$dP_{\infty} = \frac{\kappa}{F_n \cdot h_n + \sum_{i=1}^n F_i \cdot h_i} [-RT_{\varphi} \mu_{\delta} F_{\delta} B_1 + F_{n,\varphi} (x) \cdot \dot{x} \cdot P_{\varphi}] dt;$$

$$dP_{\kappa} = \frac{\kappa R (\omega T_{\varphi} \frac{B_2}{B_1} - T_{\kappa}) \mu_{\delta\varphi} F_{\delta\varphi} B_2}{\sqrt{\kappa}} dt; \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{P_{\varphi} \gamma}{x \cdot f_n} - \frac{(dx)^2 (1+\gamma)}{2x} - \frac{dx}{dt} \frac{32}{d_{n,\varphi}^3(x)} - g - \frac{4g}{d_{n,\varphi}(x) \dot{x} f_n} (6 \cos \theta + \delta P_i),$$

где ω - отношение эквивалентной площади сечения вентиляционных каналов $\mu_{\delta} F_{\delta}$ к эквивалентной площади проходного сечения дросселя $\mu_{\delta\varphi} F_{\delta\varphi}$;

$$B_1 = \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa-1} P_{\varphi} \gamma \left[\left(\frac{P_{\delta}}{P_{\varphi}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{\delta}}{P_{\varphi}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]};$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa-1} \kappa \gamma \left[\left(\frac{P_{\delta}}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{\delta}}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]};$$

$\dot{x} \left(\frac{dx}{dt} \right)$ - скорость потока сплава;

γ - кинематическая вязкость сплава;

$d_{n,\varphi}$ - диаметр канала для потока сплава;

σ - поверхностное натяжение сплава;

θ - угол смачивания потоком сплава поверхности канала;

δ - толщина окисной пленки на поверхности расплава;

P_i - усилие необходимое для разрыва окисной пленки.

Анализ системы уравнений (2) показывает, что скорость нарастания разрежения воздуха в полости формы dP_{φ}/dt и в камере установки dP_{κ}/dt определяется конструктивными параметрами: объемом полостей $F_n \cdot h_n + \sum_{i=1}^n F_i \cdot h_i$, сечением вентиляционных каналов F_{δ} , площадью проходного сечения дросселя $F_{\delta\varphi}$ и их отношением, а также величиной разрежения в ресивере P_{∞} .

Целью расчета, в данном случае, является установление зависимости между перемещением, скоростью и ускорением потока сплава и разрежением воздуха в полости формы и в камере установки.

При решении системы (2) на ЭВМ закон изменения разрежения в обеих полостях должен быть задан заранее. Не зная характера протекания рабочего процесса правильно установить эту зависимость невозможно. Поэтому, для ее решения необходимо принимать произволь-

ные допущения.

С целью решения поставленной задачи инженерными методами расчета предположили, что поднимающийся сплав не оказывает заметного влияния на процесс изменения разрежения воздуха в камере установки, т.е. в обеих полостях процесс происходит с одинаковой скоростью ($dp_k/dt = dp_p/dt$). Как показывает система (2) обеспечить это условие можно путем выбора оптимального значения λ, β и параметра ω при постоянных значениях $F_{н.р.}, h_{н.р.}, V_k, P_p$. С другой стороны, пневмо-гидросистему установок можно рассматривать как систему, имеющую демпфер. Вентиляционные каналы представляют собой сопротивление демпфера. Воздух находящийся в полости формы, при заполнении ее сплавом, является упругим элементом системы, обуславливающим ее колебательную природу.

Система (2), при указанных допущениях, была решена приближенным методом численного интегрирования на ЭМ „МИНСК-22М“. Результаты вычислений показали, что скорость потока сплава, при заполнении лопаток, постоянна по величине в период их заполнения. Инерционные силы (ускорение), при входе сплава в полость формы гасятся, приближаясь к нулю в полости лопаток.

На основании полученных результатов и с учетом обеспечения условий, когда процесс нарастания разрежения воздуха в камере $P_k = f(t)$ происходил бы плавно, без пульсаций, более простое решение газо-динамической задачи провели по следующей схеме: исследование динамики нарастания разрежения воздуха в вакуум-камере — исследование динамики заполнения газом полости формы — исследование демпфирующей способности формы, с целью гашения пульсаций потока сплава, в процессе ее заполнения. При этом были приняты следующие допущения:

1. На основании проведенного анализа работы пневмосистем установок ЛВВ процесс истечения воздуха из камеры в ресивер считался изотермическим.

2. Режим течения воздуха го эквивалентному трубопроводу принят ламинарным (вязкостным), при турбулентном течении через дроссель. Для расчета коэффициента расхода такого трубопровода использовали, распространенный в газо-гидродинамике, метод, который состоит в определении длин труб эквивалентных отдельным местным сопротивлениям. При этом расход воздуха через дроссель и местные сопротивления при турбулентном течении равен расходу воздуха при ламинарном течении через длинный трубопровод, заменяющий эти сопротивления, с разрежением воздуха на его концах P_k и P_p .

На первом этапе исследования динамики рабочего процесса установок ЛВВ были использованы: дифференциальное уравнение опустошения камеры

$$\frac{dG}{dt} = -f(p_k - p_p). \quad (3)$$

и уравнение описывающее состояние воздуха в камере установки при его изотермическом изменении

$$G = \frac{p_k \cdot V_k}{RT_k}, \quad (4)$$

где $\frac{dG}{dt}$ - весовой секундный расход воздуха;
 f - коэффициент пропорциональности между величинами весового секундного расхода воздуха и разностью разрежений в выражении характеристики расхода воздуха через ламинарный дроссель;

V_k - объем свободного пространства вакуум-камеры.

Дифференцируя (4) и решая совместно с (3), при начальных условиях $t=0$ и $p_k=0$, получили уравнение описывающее переходный процесс нарастания разрежения воздуха в камере установки

$$p_k = p_p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{уст}}}), \quad (5)$$

где $\tau_{уст} = \frac{V_k}{fRT_k}$ - постоянная времени опустошения камеры.

По аналогии с постоянной времени зарядки конденсатора постоянная времени опустошения камеры определена как произведение сопротивления пневмосистемы $R_{уст}$ и емкости всей установки $C_{уст}$

$$\tau_{уст} = \frac{128 \mu L_{np}}{\pi d^4} \left(\frac{V_k}{p_{k,ср.}} + \frac{\pi d^2 L_l}{4 p_{k,ср.}} \right), \quad (6)$$

где L_{np} - приведенная длина пневмопровода, по гидравлическому сопротивлению эквивалентная пневмосистеме установки;

d - диаметр пневмопровода;

$p_{k,ср.}$ - среднее, за весь процесс заливки формы, разрежение воздуха в камере установки $= \frac{p_p}{2}$;

L_l - длина соединительных трубопроводов.

Подставляя (6) в (5) получили уравнение нарастания разрежения воздуха в камере установки

$$p_k = p_p \left[1 - \exp \left\{ - \frac{t}{\frac{128 \mu L_{np}}{\pi d^4} \left(\frac{V_k}{p_{k,ср.}} + \frac{\pi d^2 L_l}{4 p_{k,ср.}} \right)} \right\} \right]. \quad (7)$$

Приведенная длина пневмопровода L_{np} определена как длина, характеризующая потерю напора в местных сопротивлениях дросселе и длину соединительных трубопроводов.

Скорость течения воздуха по трубопроводу определялась по

$$v_{п.ср.} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2gk}{k-1} RT_k \left[1 - \left(\frac{p}{p_{кн.}} \right)^{\frac{k-1}{n}} \right]},$$

где n - показатель политропы $= \frac{1}{\sqrt{\gamma_p}}$;

$P_{к.н.}$ - разрежение в камере в начальный момент времени.

При выводе уравнений (3) и (7) величина P_p принималась постоянным в процессе заливки формы. Для выполнения этого условия определено оптимальное значение отношения объема ресивера к объему вакуум-камеры. Оно должно быть не менее 13.

На втором этапе исследования связь между скоростью нарастания разрежения воздуха в камере и скоростью заполнения формы сплавом была определена на основе рассмотрения закономерностей течения жидкости в двух сообщающихся сосудах, из уравнения Бернулли для неустановившегося движения потока под действием разрежения P_k , создаваемого в камере установки, с учетом сил поверхностного натяжения и сил необходимых для разрыва поверхностно-окисленной пленки расплава. Уравнение в производных имеет вид:

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{P_k \cdot g}{h \cdot \gamma_m} - \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \frac{(1 + \Sigma \eta)}{2h} - \frac{dh}{dt} \frac{32\eta}{d^2} - g - \frac{4\sigma}{d \cdot h \cdot \gamma_m} (6 \cos \theta \cdot \delta \rho_1), \quad (8)$$

где h - высота подъема сплава.

Уравнение (8) показывает, что скоростные режимы литья (ускорение d^2h/dt^2 , скорость dh/dt и путь h) определяются величиной P_k , суммой коэффициентов сопротивления потоку сплава и в некоторой степени физическими параметрами сплава. В свою очередь, согласно (7), величина P_k определяется степенью разрежения в ресивере P_p и конструктивными параметрами установки: $F_p, V_k, L_{кр.}$.

На третьем этапе, с целью предотвращения колебаний в пневмо-гидросистеме установок исследовали демпфирующую способность формы, т.е. определения площади сечения вентиляционных каналов.

Поставленную задачу для условий $\Delta P_{кп} = \Delta P_{фк} = f(\Delta t)$, решили следующим образом. Предположили, что камера и полость формы представляют одну полость. Тогда в первых двух уравнениях системы (2) коэффициенты B_1 и B_2 будут равны. Приравнявая правые части уравнений и проведя несложные преобразования получили зависимость, определяющую эквивалентную площадь сечения вентиляционных каналов

$$(\mu_s F_s) = \frac{F_{п.ф}(x) \cdot P_k \cdot x \cdot V_k + (\mu_p F_p \cdot B_2 (f \cdot h_n + \sum F_{п.ф} \cdot h_{п.ф})) \cdot RT_k}{RT_p \cdot B_2 (V_k + F_{п.ф} \cdot h_n + \sum F_{п.ф} \cdot h_{п.ф})} \quad (9)$$

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния пневмо-гидравлических и тепловых параметров на заполняемость, прочность и плотность отливок.

Для решения поставленных задач была спроектирована и изготовлена опытно-промышленная установка ЛВВ.

На основании проведенного анализа конструкций деталей класса „крыльчатка“, в качестве экспериментальной была принята отливка с набором 24-х тонких лопаток разной толщины: 1,0-1,5-2,0-2,5-3,0-3,5 мм. Ширина лопаток 79 мм, высота 95 мм ($F = 7000 \text{ мм}^2$). Для указанной отливки был разработан и изготовлен кокиль. Нижняя часть кокиля оформлялась головкой металлопровода. Вентиляционные каналы, выполненные в крышке, представляли собой спираль размером 0,3х0,4 мм. Площадь каналов 10-12 мм². Диаметр металлопровода был принят постоянным - 32 мм.

Связь нарастания разрежения в камере со скоростью и характером движения сплава в форме исследовалась методом моделирования с использованием скоростной киносъемки. Моделирующая установка состояла из камеры и формы изготовленных из плексигласа. Остальные узлы использовались от опытно-промышленной установки. Форма для моделирования включала в себя элементы экспериментального кокиля в натуральную величину. Моделью расплава служила окрашенная вода по кинематической вязкости равная силумину при 750-780 °С. Для обеспечения подобия распределения скоростей на границах потока (критерий Ньютона) было сохранено равенство расходов моделирующей жидкости и сплава. Было обеспечено также динамическое подобие пневматической системы (критерий Эйлера). Процесс заполнения полости формы фиксировался скоростной кинокамерой „ПЕНТАЦЕТ-35“.

Для исследования движения жидкого металла в полость кокиля устанавливались проволочные контакты, соединенные с рядом сопротивлений, входящих в электрическую цепь штейфа осциллографа.

В качестве датчика, преобразующего разрежение в камере в электрические импульсы, применялся спроектированный нами мембранный датчик разрежения. Регистрация показаний датчика осуществлялась при помощи усилителя и осциллографа Н-700.

Температура жидкого металла в типичной установке контролировалась на термопарой погружением через металлопровод.

Для замера температуры рабочей поверхности кокиля был использован датчик аналогичный датчику, разработанному В.П.Новиковым *).

Толщина слоя краски измерялась прибором ИТП-1 и периодически контролировалась микрометром. Заливался сплав АЛ-4. Механические

*) В.П.Новиков. Технологические основы управления температурным режимом прессформ литья под давлением. Диссертация. МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1966.

свойства определялись на плоских образцах вырезанных из нетермо-обработанных отливок. Заполняемость форм оценивалась по проценту площади залитых лопаток от их полной площади. Плотность отливок определялась методом гидростатического взвешивания образцов вырезанных из отливок. Эталоном служил образец полученный под давлением на 30-ти тонном прессе.

Все эксперименты были проведены в пять этапов.

На первом этапе проводилась проверка расчетных зависимостей. Исследовалось влияние разрежения в ресивере P_p , объема камеры V_k и площади сечения дросселя F_{dp} на скорость нарастания разрежения воздуха в камере установки $P_k = f(t)$ и динамику заполнения формы.

Результаты проведенных расчетов по приведенным формулам подтвердились экспериментально. Разница в показаниях не превышала 5%. Установлено, что изменение разрежения в ресивере от 66 кн/м^2 до 3^2 кн/м^2 на скорость нарастания разрежения в камере, в пределах величины необходимой для заполнения формы, влияния не оказывает. Увеличение площади сечения дросселя на 100% увеличило скорость нарастания разрежения на 111%. Заливка кокиля сплавом показала, что заполнение происходит и заканчивается во время переходного процесса нарастания разрежения в камере по экспоненте. Форма заполнилась при $P_k = 87 \text{ кн/м}^2$. Выявлено, что управлять технологическим процессом (эффективно регулировать скоростные режимы литья) можно путем изменения двух параметров — F_{dp} и V_k .

На втором этапе проводились исследования по выявлению связи нарастания разрежения воздуха в камере со скоростью и характером движения сплава в форме. Опыты проводились на моделирующей установке с разными сечениями дросселя: $F_{dp_1} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $F_{dp_2} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $F_{dp_3} = 2,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Параметр ω менялся от 2 до 30 путем изменения сечения вентиляционных каналов.

Результаты экспериментов показали, что пульсирующий характер нарастания разрежения имеет место при значении $\omega > 3$. Анализ киограмм показал, что амплитуда и частота пульсаций потока усиливается с увеличением ω . При $\omega = 30$ и $F_{dp} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ движение потока характеризовалось интенсивным перемешиванием жидкости с воздухом и пульсацией скорости. Скорость менялась от 0,2 до 0,3 м/сек. При $\omega = 2$ и $F_{dp} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ движение жидкости было спокойным, без пульсаций и захвата воздуха. Скорость потока жидкости при заполнении лопаток была постоянной и равной 0,27 м/сек. Во всех опытах наблюдалось отставание уровня потока в лопатках от уровня его в дополнительной широкой полости на 20-25%. Это говорит о влиянии сил

поверхностного натяжения и гидравлических сопротивлений и указывает на необходимость их учета. Таким образом заливка подобных деталей должна производиться со скоростью не более 0,3-0,4 м/сек, при этом сечение вентиляционных каналов должно быть оптимальным.

На третьем этапе результаты моделирования проверялись заливкой экспериментальной формы сплавом. Полученные данные подтвердили выводы сделанные при моделировании процесса.

Таким образом результаты экспериментов второго и третьего этапов показали, что колебательный характер потока сплава можно погасить путем оптимального выбора таких параметров как G_b и $G_{ар}$.

На четвертом этапе проводилась оптимизация технологических параметров литья деталей "крыльчатка" методом вакуумного всасывания. Учитывая многофакторную зависимость качества отливки от технологических параметров использовали метод математического планирования эксперимента. В качестве независимых переменных были выбраны следующие факторы:

X_1 - температура сплава при заливке формы, °C; X_2 - температура металлической формы, °C; X_3 - толщина слоя краски, м; X_4 - площадь проходного сечения дросселя, м²; X_5 - разрежение воздуха в ресивере, н/м². Параметром оптимизации служили заполняемость Y_1 и прочность Y_2 .

Результаты экспериментов. Установлено, что факторы X_3 и X_5 , в исследуемых пределах, на заполняемость форм влияния практически не оказывают. Анализ уравнений регрессии показал, что наиболее сильно влияют на заполняемость температура сплава и площадь сечения дросселя. Меньшее влияние оказывает температура формы. После проведения 16-ти опытов оптимум по заполняемости для толщин лопаток 1,0 мм не был достигнут. Ограничиваясь линейным приближением осуществили движение по градиенту линейного уравнения

$$Y_1^{1,0} = 90,1 + 6,16X_1 + 0,98X_2 + 0,13X_3 + 6,8X_4 + 0,24X_5$$

в область оптимума. После проведения первого опыта была получена 100%-я заполняемость, но при этом наблюдался брак отливок по газовым раковинам и разрыву тела лопаток. Пришлось сечение дросселя зафиксировать на значении $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и продолжать движение по X_1 и X_2 . Условия второго опыта дали положительный результат.

Полученные результаты по механическим свойствам анализировались с точки зрения влияния отдельных факторов на прочность отливок. Установлено, что с повышением температуры сплава и металлической формы прочность материала отливок в лопатках снижается незначительно.

Проведенные эксперименты по оптимизации литья вакуумным всасыванием деталей „крыльчатка“ показали, что для получения качественного литья необходимо четкое согласование тепловых и пневмо-гидравлических параметров литья.

На пятом этапе исследовано влияние степени низкого давления сжатого воздуха, подаваемого на сплав в тигле при кристаллизации его в форме, на плотность и прочность отливок получаемых вакуумным всасыванием. Опыты проводились при избыточных давлениях воздуха в ресивере. $1,83 \cdot 10^5 - 2,03 \cdot 10^5 - 2,22 \cdot 10^5$ н/м².

Результаты экспериментов. Повышение величины давления до $1,83 \cdot 10^5$ н/м² ведет к некоторому повышению плотности металла (с $2,583$ до $2,61 \cdot 10^3$ кг/м³). Прочность лопаток, с приложением всех величин давлений, осталась неизменной (19 кг/мм²). Давление свыше $1,83 \cdot 10^5$ н/м² (давление на металл в тигле $1,37 \cdot 10^5$ н/м² + разрежение в камере с формой $0,46 \cdot 10^5$ н/м²) влияния на повышение плотности металла в отливках практически не оказывает. Плотность повысилась на $0,006 \cdot 10^3$ кг/м³. Прочность материала отливок в массивной части, с приложением давления повысилась с $17,3$ до $18,5$ кг/мм². Более интенсивное повышение прочности (7%) по сравнению с плотностью (1,1%) вызвано, на наш взгляд, влиянием избыточного давления на скорость затвердевания отливки в массивной части, из-за уменьшения зазора между рабочей поверхностью кокиля и затвердевающей отливкой и увеличением скорости теплопередачи. Микроструктура в этом случае более мелкозернистая.

С целью увеличения прочности материала отливок в массивной части считаем возможным применение комбинированного метода изготовления подобных отливок.

В четвертой главе на базе теоретического и экспериментального исследования рабочего процесса установок ЛВВ предложены рекомендации и методика расчета основных конструктивных параметров и пневмо-гидравлических и тепловых режимов литья, с учетом характера и скорости заполнения полости форм тонкостенных деталей. Методика расчета конструктивных и пневмо-гидравлических параметров рабочего процесса установок ЛВВ, а также площади сечения вентиляционных каналов, обеспечивающих получение заданного закона $P_K = f(t)$ через постоянную площадь проходного сечения дросселя $F_{др}$, может быть следующей:

1. строится схема процесса литья конкретной детали с выделением отдельных, характерных участков пути потока сплава;

2. по установленной оптимальной скорости заполнения

полости формы образующей лопатки, из условий неразрывности потока по различным сечениям, определяется скорость на всех участках. При расчете на ЭВМ используется система уравнений (2);

3. по формуле (8) определяется необходимая величина разрежения для обеспечения заполнения указанных участков;

4. по формуле (7) определяется приведенная длина пневмопровода;

5. по приведенной длине пневмопровода определяется эквивалентная длина трубопровода и площадь проходного сечения дросселя;

6. по формуле (9) определяется оптимальная площадь сечения вентиляционных каналов $F_в$, обеспечивающая заданный закон изменения $P_k = f(t)$ и $h = f(t)$;

7. исходя из геометрии и технологических требований к заполнению формы конкретной отливки по формулам приведенным в работе ***) определяется оптимальная температура заливки сплава.

Предложенная методика проверена при заливке вакуумным всасыванием пяти конкретных деталей класса "крыльчатка".

В ы в о д ы

1. Проведено аналитическое исследование динамики рабочего процесса установок литья вакуумным всасыванием, что позволило:

а) установить характер течения воздуха по пневмосистеме и выбрать направление для решения газо-динамической задачи;

б) создать методику расчета, связывающую основные конструктивные параметры установки и пневмо-гидравлические режимы литья.

2. Спроектирована и изготовлена опытно-промышленная установка литья вакуумным всасыванием с применением избыточного давления сжатого воздуха при кристаллизации сложных отливок, сочетающих тонкие части с массивными.

3. В результате экспериментального исследования динамики рабочего процесса установок ЛВВ установлено:

а) также как и при литье под низким давлением заполнение форм заканчивается во время нарастания разрежения воздуха в камере установки, т.е. в неустановившемся режиме. Процесс заполнения формы сплавом может иметь пульсирующий характер;

б) подтверждена обоснованность аналитических зависимостей

*** Г.Ф. Балацкий, Э.Ч. Гинг. Расчет технологических режимов при литье тонкостенных изделий под низким давлением. "Известия ВУЗов СССР, машиностроение". № 1. 1964.

рекомендованных для расчета параметров процесса;

в) решающими факторами, влияющими на процесс нарастания разрежения воздуха в камере установки, являются площадь проходного сечения дросселя и объем свободного пространства вакуум-камеры.

4. Экспериментально, на моделирующей установке и при заливке формы сплавом, показано, что максимальная скорость заполнения полости формы образующей лопатки, при которой не происходит захвата воздуха и фонтанирования потока, не должна превышать 0,4 м/сек.

5. Проведено экспериментальное исследование влияния пневмо-гидравлических и тепловых параметров литья деталей "крыльчатка" вакуумным всасыванием на качество отливок методом математического планирования эксперимента. Установлено, что тепловые параметры литья в значительной степени влияют на заполняемость тонкостенных частей отливок (лопаток толщиной до 2-х мм). Пневмо-гидравлические параметры литья оказывают большое влияние на заполняемость форм и появление специфического брака отливок (вмятины, разрывы тела лопаток и т. д.). Определены оптимальные параметры литья для отливок с различной толщиной стенки лопаток.

6. Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что на характер заполнения формы сплавом большое влияние оказывает демпфирующая способность формы и всей вакуумсистемы в целом, которая определяется, в основном, величиной сечения вентиляционных каналов в форме. При отношении указанной площади к площади проходного сечения дросселя $(\mu_s F_s / \mu_d F_d) = 1 + 5$ колебательный процесс заполнения формы сплавом не наблюдался и появлялся при отношении более 5.

7. Низкое давление сжатого воздуха, подаваемого на сплав в тигле, после заполнения вакуумным всасыванием, в пределах $1,83 - 2,22 \cdot 10^5$ н/м² увеличивает плотность отливок в массивной части на 1%. Прочность отливок увеличивается на 7% при том же давлении.

8. Разработана и внедрена технология изготовления 5-ти наименований отливок методом вакуумного всасывания.

9. Спроектирована, изготовлена и внедряется промышленная установка литья вакуумным всасыванием сложных тонкостенных деталей.

10. Общий экономический эффект, за счет перевода изготовления 5-ти наименований деталей на литье методом вакуумного всасывания, по результатам проведенных исследований, составил 30 т. рублей в год (в условиях опытного производства).

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Рыжков Н.Ф. Изготовление отливок деталей "крыльчатка" методом вакуумного всасывания. Изд-во Алтайского ЦНТИ, №121-72.
2. Рыжков Н.Ф. Изготовление отливок методом вакуумного всасывания. Сб. "Технологии, организация и механизация литейного производства". Изд-во НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 9-72-23, М., 1972.
3. Гини Э.Ч., Рыжков Н.Ф. Отливка крыльчаток методом вакуумного всасывания. "Литейное производство", №5, 1973.
4. Рыжков Н.Ф. Исследование динамики рабочего процесса установок литья вакуумным всасыванием. Тезисы докладов к краевой научно-технической конференции "Теория и практика внедрения автоматизации и комплексной механизации в литейных цехах". Изд-во Алтайского краевого правления НТО машиностроения и Алтайского ЦНТИ, Барнаул, 1974.