

4. Котлярский Ф. М. Исследование процесса формирования отливок из алюминиевокремниевых сплавов в зависимости от условий питания: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1975. – 216 с.
5. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. О состоянии двухфазной области кристаллизующихся силуминов // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 22-25.
6. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – Киев: Освіта України, 2011. – 208 с.
7. Борисов А. Г. О механизме формирования недендритной структуры // Процессы литья. – 2011. – № 5. – С.19-28.

Поступила 17.04.2012

УДК 621.74.01-621.74.042-621.74.046

Н. А. Жижкина

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ ВАЛКОВ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ

Изучено формирование массивных отливок, получаемых центробежным методом. Исследовано влияние давления вращающегося расплава на напряженно-деформированное состояние затвердевшей корки металла рабочего слоя. В результате получены зависимости, позволяющие рассчитать усилие давления вращающегося расплава и оценить напряженно-деформированное состояние корки затвердевшего металла. Установлено, что превышение уровня напряжений литой корки максимально допустимых значений для исследуемого материала приводит к нарушению ее сплошности.

Ключевые слова: отливки, центробежное литье, давление, напряженно-деформированное состояние, валки.

Вивченню формування масивних виливків, що отримують за допомогою відцентрового литва. Досліджено вплив тиску розплаву, що обертається, на напружено-деформований стан кірки металу робочого шару, що твердне. В результаті отримано залежності, що дозволяють розрахувати зусилля тиску розплаву, що обертається, та оцінити напружено-деформований стан кірки металу, що твердне. Встановлено, що перевищення рівня напружень литої кірки максимально допустимих значень для матеріалу, що досліджується, приводить до порушень її суцільності.

Ключові слова: виливки, відцентрове лиття, тиск, напружено-деформований стан, валки.

Devoted to study formation of massive castings, which got by centrifugal method. The influence rotated alloys pressure on stress and deformation condition of solid metal crust has been researched. As a result received relations make it impossible to calculate the force of rotated alloy pressure and to value the stress and deformation condition of solid metal crust. It has been established, that level of casted crust stresses excesses maximum permissible value for researched material, its solid is disturbed.

Keywords: castings, centrifugal casting, pressure, stress and deformation condition, rolls.

Массивные валки с рабочим слоем из высокотвердых и износостойких материалов изготавливают центробежным методом. Такое литье крупнотоннажных изделий, которое одновременно характеризуется износостойкостью и пластично-

стью, является довольно сложным технологическим процессом и зависит от гидростатических и гидродинамических явлений, протекающих в заливаемом расплаве. Плотность вращающегося расплава влияет на уровень физико-механических свойств, а геометрия его свободной поверхности определяет равномерность распределения характеристик вдоль отливки. Описание законов вращения жидкого металла и движения неметаллических включений в нем под действием центробежных сил способствует пониманию процесса заполнения формы и кристаллизации отливки без дефектов в ее теле. Для валкового производства важным и актуальным является изучение влияния давления вращающегося расплава рабочего слоя на стенки формы и корку затвердевшего металла, мгновенно образующуюся на поверхности в результате теплового обмена между ним и стенкой кокиля.

Известно [1-3], что корка затвердевшего металла в результате воздействия вращающегося горячего расплава имеет сложное температурное и напряженное состояние, что вызывает развитие деформации ползучести материала рабочего слоя. Превышение ее показателем прочностных и упругих свойств высоколегированного чугуна приводит к нарушению сплошности тонкой корки, и, как следствие, образованию центров зарождения трещин на рабочей поверхности формируемой отливки.

В связи с этим целью настоящей работы явилось изучение влияния давления, развиваемого во вращающемся расплаве, на напряженно-деформированное состояние корки затвердевшего металла рабочего слоя.

Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи:

- определение усилия давления вращающегося расплава, действующего на поверхности затвердевшей корки;
- оценка напряженно-деформированного состояния корки затвердевшего металла;
- анализ влияния уровня напряжений, формируемых в затвердевшей корке, на образование дефектов на литой поверхности бочки массивных валков.

Для изучения влияния давления, развиваемого во вращающемся расплаве, на напряженно-деформированное состояние корки рассчитали его силу на элементарную площадку поверхности затвердевшего металла рабочего слоя по формуле

$$dP = p_{cp} dS_{з.к}, \quad (1)$$

где p_{cp} – среднее по высоте полости формы гидростатическое давление (Па), развиваемое в движущемся расплаве у поверхности затвердевшей корки;

$$p_{cp} = \frac{\rho_{распл} \omega^2}{4} \left[2R^2 - (R - l_n)^2 - (R - l_b)^2 \right], \quad (2)$$

где $\rho_{распл}$ – плотность расплава, кг/м³; ω – скорость вращения формы, рад/с; R – радиус отливки в рассматриваемом сечении м; l_n – величина слоя металла у нижнего торца бочки, м; l_b – у верхнего, м.

Площадь поверхности $S_{з.к}$ определяли согласно [4] по формуле

$$S_{з.к} = 2\pi RH, \quad (3)$$

где H – высота полости формы, образующей бочку отливки, м.

Для нахождения полной силы давления вращающегося жидкого расплава на внутреннюю поверхность корки затвердевшего металла подставляли в выражения (1) формул (2), (3) и, проинтегрировав его по $S_{з.к}$, получили

$$P = \frac{\pi RH \rho_{распл} \omega^2}{2} \cdot (2Rl_n - l_n^2 + 2Rl_b - l_b^2), \quad (4)$$

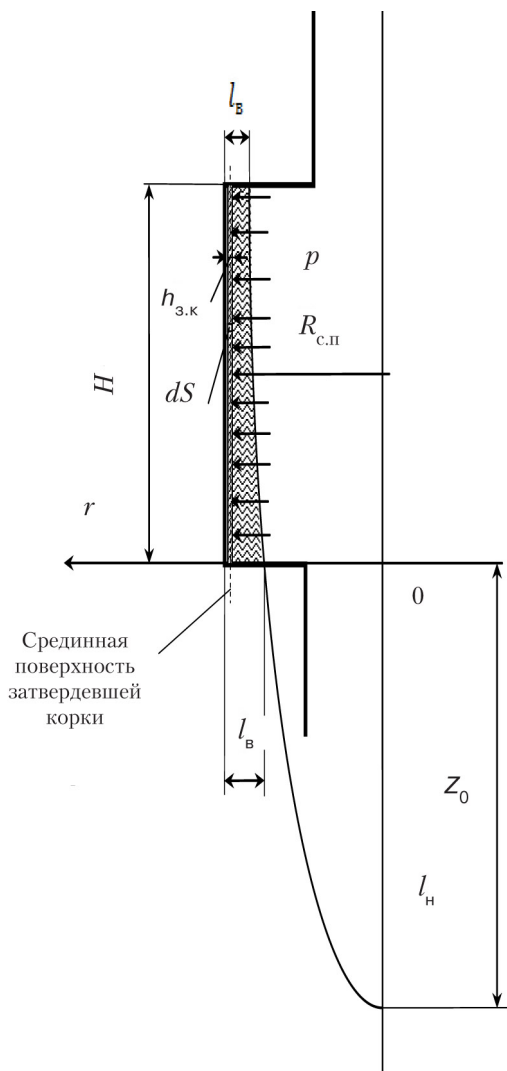


Рис. 1. Распределение давления на поверхности корки затвердевшего металла

местному приторцовому изгибу и его влияние на деформацию в срединной поверхности пренебрежительно мало;

– температура, равномерно изменяющаяся вдоль тонкой цилиндрической оболочки, не накладывает дополнительных напряжений в ней.

Согласно принятым допущениям и в соответствии с работами [5-8], максимальное главное напряжение в оболочке $\sigma_{\text{норм}}$ (Па) вычисляли по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{норм}} = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_m + \sigma_m^2}, \quad (6)$$

где σ_r – окружное напряжение от внутреннего давления (Па); σ_m – меридиональное напряжение (Па).

Для определения σ_m и σ_r в рассматриваемой оболочке выделили элемент $abcd$ площадью dS . Условие равновесия элемента $abcd$ выражается в виде суммы проекций

Ранее проведенные металлографические исследования [2] показали, что величина слоя корки затвердевшего металла не превышает 5 мм. Согласно [5-8] затвердевшая корка является тонкой цилиндрической оболочкой, характеризующейся постоянными величинами радиуса кривизны R и толщины слоя $h_{з.к}$ и удовлетворяющей условию

$$\frac{h_{з.к}}{R} \leq \frac{1}{20}. \quad (5)$$

Для описания напряженно-деформированного состояния оболочки затвердевшей корки в работе принят ряд допущений:

- материал оболочки изотропен;
- корка обладает идеальной упругостью;
- взаимосвязь между напряжениями и деформацией оболочки подчиняется закону Гука;
- сила давления жидкого расплава (4) нормальна к срединной поверхности, оболочки, интенсивность которой на корку равномерна (рис. 1), следовательно, ее напряженное состояние также однородно;
- линейные элементы оболочки, перпендикулярные к ее срединной поверхности, остаются прямолинейными и нормальными к ней;
- оболочка и сила давления жидкого расплава симметричны относительно оси вращения, касательные напряжения отсутствуют;

– перемещение точек корки малы по сравнению с величиной ее слоя;

– затвердевшая корка подвержена

всех действующих сил на нормаль к оболочке, проведенную в его центре (рис. 2). Такой элемент оболочки, выделенный двумя меридиональными и двумя экваториальными сечениями, можно считать испытывающим плоское деформированное состояние.

Тогда уравнение равновесия элементарной площадки $abcd$ выражается согласно работе [7] формулой Лапласа

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_r}{R_2} = \frac{p_{cp}}{h_{3,к}} \quad (7)$$

Где R_1 – радиус кривизны оболочки вдоль ее меридиана, м; R_2 – радиус кривизны по окружности оболочки, м.

В случае затвердевшей корки $R_1 = \infty$ и $R_2 = R_{с.п.}$. Следовательно, окружное напряжение определяли по следующей формуле:

$$\sigma_r = \frac{\rho_{ср} R_{с.п.}}{h_{3,к}}, \quad (8)$$

где $R_{с.п.}$ – величина радиуса кривизны срединной поверхности оболочки, м.

Радиус кривизны срединной поверхности оболочки вычисляли по формуле

$$R_{с.п.} = R - \frac{h_{3,к.}}{2}. \quad (9)$$

Поскольку корка затвердевшего металла представляет собой длинную цилиндрическую оболочку без торцевых днищ (см. рис. 1), то меридиональное напряжение σ_m определяли по формуле

$$\sigma_m = \mu \sigma_r = \mu \frac{\rho_{ср} R_{с.п.}}{h_{3,к}}, \quad (10)$$

где $\mu = 0,23-0,27$ – коэффициент Пуассона для белого чугуна [9].

Подставляя зависимости (7)-(10) в формулу (6), получили выражение для максимального главного напряжения $\sigma_{норм}$, развиваемого в корке затвердевшего металла

$$\sigma_{норм} = \frac{\rho_{распл} \omega^2 R_{с.п.} (2Rl_H - l_H^2 + 2Rl_B - l_B^2)}{4h_{3,к}} \sqrt{1 - \mu + \mu^2}. \quad (11)$$

Изучение процесса деформации корки затвердевшего металла при постоянном гидростатическом нагружении в условиях повышенных температур ($0,4 \div 0,6 T_{пл}$) показало, что достоверно оценить надежность и стойкость такой оболочки позволяет показатель кратковременной прочности σ_B^T [3, 8].

Следовательно, условием прочности и устойчивости рассматриваемой оболочки является выражение

$$\sigma_{норм} \leq \sigma_B^T, \quad (12)$$

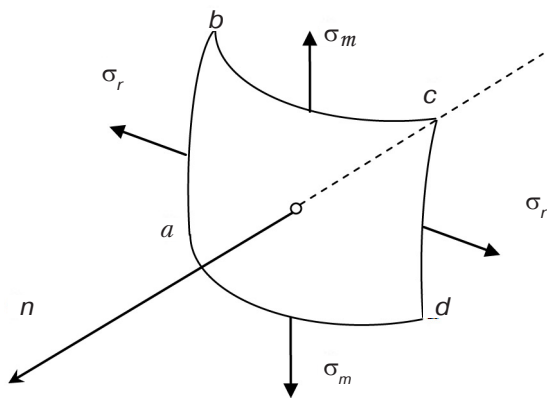


Рис. 2. Условие равновесия элемента $abcd$ площадью dS

где σ_B^T – предел прочности оболочки при растяжении с учетом влияния температуры на свойства ее материала, Па. Согласно [9] при температуре затвердевшей корки $T_{з.к} = 1073$ К. Средние значения предела кратковременной прочности белого чугуна составляют $\sigma_B^T = 20-40$ МПа.

Подставив выражение (11) в (12), выразили условие прочности корки затвердевшего металла под давлением вращающегося жидкого расплава

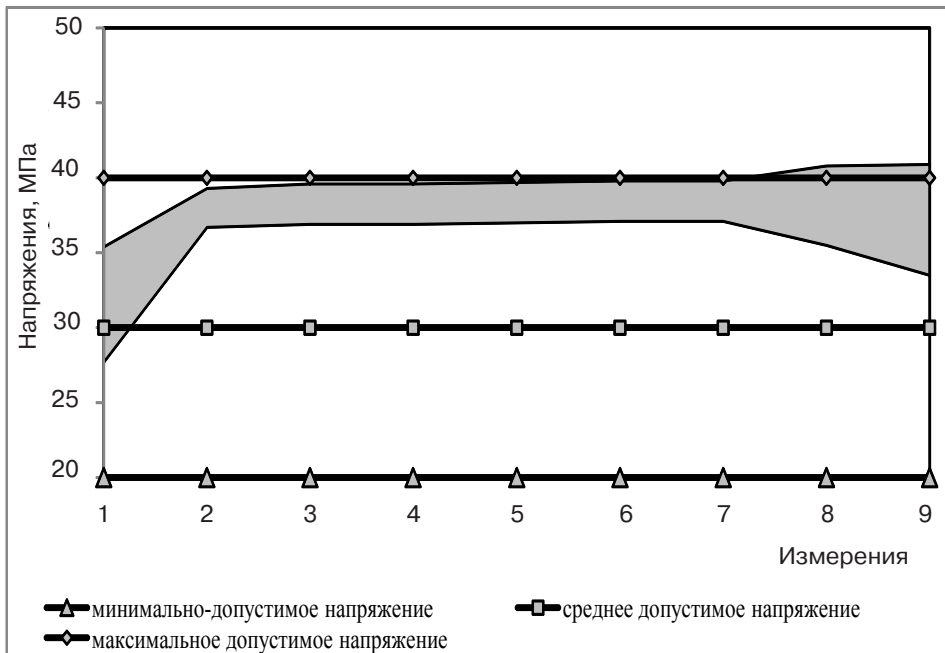
$$\frac{\rho_{распл} \omega^2 R_{с.п} (2R_{лн} - l_{лн}^2 + 2R_{лв} - l_{лв}^2)}{4h_{з.к}} \sqrt{1\mu + \mu^2} \leq \sigma_B^T. \quad (13)$$

Согласно уравнению (13) оценили уровень напряжений, сформировавшийся в затвердевшей корке под действием давления, развиваемого во вращающемся расплаве, в отливках фиксированного типоразмера (таблица). Анализ исследуемой группы валков показал, что затвердевшие корки у 50 % отливок характеризуются достаточной сопротивляемостью возникающим деформациям и одновременно стойкостью к разрушению, поскольку не было замечено нарушения сплошности рабочей поверхности (таблица). Уровень напряжений в таких валках находится в пределах от 27,7 до 40,9 МПа, что соответствует допустимым пределам для анализируемого чугуна (20-40 МПа).

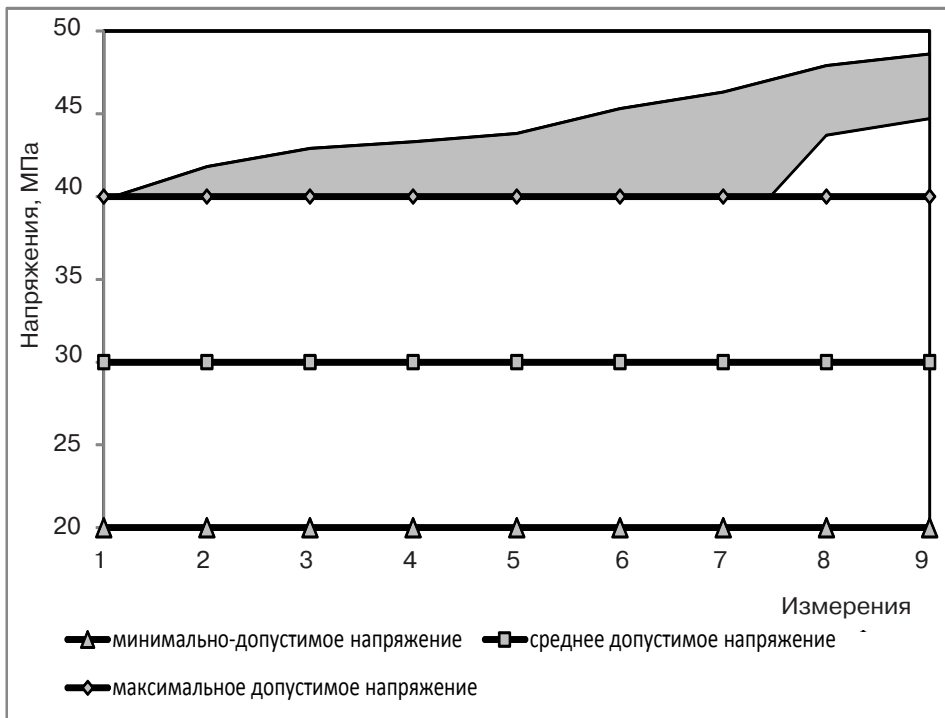
Нарушения сплошности наблюдались на заготовках, максимальный уровень напряжений которых значительно превышал 40 МПа (рис. 3). При этом установили, что на поверхности отливок, характеризующихся $\sigma_{норм}^{max} = 41,8 - 45,31$ МПа,

Анализ напряженно-деформированного состояния затвердевшей корки, подверженной действию давления, развиваемого во вращающемся жидком металле рабочего слоя

Условный номер отливки	Напряжение в затвердевшей корке, МПа						Замечания при механической обработке
	расчетное $\sigma_{норм}$			допустимое σ_B^T			
	max	min	Δ	max	min	Δ	
1	46,7	30,6	38,7	40,0	20,0	30,0	горячая трещина
2	40,9	33,5	37,2	40,0	20,0	30,0	нет
3	40,8	35,5	38,1	40,0	20,0	30,0	нет
4	35,4	27,6	31,6	40,0	20,0	30,0	нет
5	47,9	43,7	45,8	40,0	20,0	30,0	горячая трещина
6	48,6	44,7	46,7	40,0	20,0	30,0	горячая трещина
7	42,91	38,8	40,89	40,0	20,0	30,0	раковины
8	45,31	34,8	40,05	40,0	20,0	30,0	раковины
9	41,8	34,4	38,1	40,0	20,0	30,0	раковины
10	43,8	34,8	39,3	40,0	20,0	30,0	раковины
11	39,3	36,6	37,9	40,0	20,0	30,0	нет
12	43,3	39,1	41,2	40,0	20,0	30,0	горячая трещина
13	39,6	36,96	38,3	40,0	20,0	30,0	раковины
14	39,6	36,9	38,3	40,0	20,0	30,0	нет
15	39,7	37,0	38,4	40,0	20,0	30,0	нет
16	46,3	36,9	41,6	40,0	20,0	30,0	горячая трещина
17	39,8	37,1	38,4	40,0	20,0	30,0	нет
18	39,8	37,1	38,4	40,0	20,0	30,0	нет



а



б

Рис. 3. Область расчетных значений $\sigma_{\text{норм}}$ и уровень допустимых напряжений $\sigma_{\text{в}}^T$ в застывшей корке отливок, к поверхности которых не было замечаний (а) и имелись дефекты (б)

наблюдались раковины. Заготовки с максимальными в исследуемой группе значениями напряжений ($\sigma_{\text{норм}}^{\text{max}} \geq 43,3 \text{ МПа}$) характеризовались формированием на рабочей поверхности горячих трещин.

Выводы

- Изучено влияние давления, развиваемого во вращающемся расплаве, на напряженно-деформированное состояние корки затвердевшего металла рабочего слоя, образующейся у поверхности формы в результате теплового обмена между отливкой и стенкой кокиля. В результате получены зависимости, позволяющие рассчитать усилие давления вращающегося расплава и оценить напряженно-деформированное состояние корки затвердевшего металла.

- Анализ качества массивных валков фиксированного типа и размера показал, что для предотвращения нарушения сплошности литой корки на их рабочей поверхности необходимо, чтобы уровень напряжений в ней не превышал максимально допустимого значения (40 МПа), в противном случае возможно образование дефектов. Превышение максимально допустимого уровня напряжений на 8 % (3 МПа) способствует формированию горячих трещин по бочке отливки.

- Вместе с тем, качество валков зависит от процессов охлаждения и затвердевания не только литой поверхности, но и всей отливки в целом. Для изучения таких процессов необходимо проведение дополнительных исследований. Поэтому работа в этом направлении продолжается.



Список литературы

1. Юдин С. Б., Розенфельд С. Е., Левин М. М. Центробежное литье. – М.: Машгиз, 1962. – 360 с.
2. Жижкина Н. А. Производство центробежнолитых валков с высоколегированным рабочим слоем. – Луганск: «Ноулидж», 2011. – 167 с.
3. Троицкий Г. Н. Свойства чугуна / Под ред. М. Г. Бкнова. – М.: Metallurgizdat, 1941. – 290 с.
4. Воднев В. Т., Наумович А. Ф., Наумович Н. Ф. Основные математические формулы : справочник / Под ред. Ю. С. Богданова. – Минск: Высшая школа, 1988. – 270 с.
5. Багмутов В. П., Белов А. В., Поливанов А. А. Использование различных критериев длительной прочности при расчетах однослойных и многослойных оболочек вращения // Прогрессивные технологии в обучении и производстве. – Камышин, 2003. – Том 1. – С. 152-156.
6. Качанов Л. Н. Основы механики разрушения: монография. – М.: Наука, 1971. – 311 с.
7. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей: монография. – Ижевск: РХД, 2002. – 912 с.
8. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки: Пер. с англ. В. И. Контонта / Под ред. Г. С. Шапиро. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
9. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. – М.-Л.: Машгиз, 1961. – 800 с.

Поступила 18.04.2012