

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет»

ЛИТЕЙНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОТЛИВКАХ

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Теория литейных процессов»

Хабаровск
ТОГУ
2017

УДК 621.74

Литейные напряжения в отливках: Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Теория литейных процессов» для студентов направлений подготовки 150400.62 - «Металлургия» и 261400.62 - «Технология художественной обработки материалов» / сост. А. В. Щекин. – Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2017. – 22 с.

Методические указания разработаны на кафедре «Литейное производство и технология металлов» в соответствии с учебным планом и на основании программы дисциплины «Теория литейных процессов». В них описывается физическая природа литейных напряжений и деформации в отливках. Технологические факторы, влияющие на формирование напряжений и способы их предупреждения. Приводится методика определения величины остаточных напряжений при формировании специального литого образца.

Подготовлены в соответствии с решениями кафедры литейного производства и технологии металлов и методического совета института автоматизации и информационных технологий.

Цель работы: Ознакомиться с основными закономерностями, связанными с кинетикой образования литейных напряжений и способами их снижения. Изучить зависимость литейных напряжений в отливках от изменения технологических параметров литья. Приобрести навыки экспериментального определения остаточных напряжений на специальной пробе.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Литейные напряжения в отливках

В процессе затвердевания и охлаждения отливок в форме в них всегда имеют место усадочные явления. При этом в условиях реальной литейной формы усадка практически всегда является затрудненной. То есть процессу сокращения размеров при охлаждении всегда имеются препятствия. В результате неравномерности сокращения размеров в отливке появляются напряжения.

Напряжения, возникающие в процессе первичного охлаждения отливки в форме, называются литейными. Причем напряжения могут быть как растягивающие, так и сжимающие. Если материал отливки при охлаждении претерпевает фазовые изменения (превращения), сопровождающиеся изменением удельного объема, то в результате теплового торможения возникают фазовые напряжения.

Если возникающие напряжения в какой-то части отливки превысят прочность материала при данной температуре, материал разрушается. Разрушения материала отливки, возникающие при высоких температурах, называют горячими трещинами, а при комнатной – холодными.

Величина возникающих литейных напряжений зависит от коэффициента теплового расширения металла, модуля упругости и градиента температуры в сечении отливки. Значение градиента температуры зависит от химического состава сплава, конструкции отливки и технологии ее изготовления, а также от теплофизических свойств формы. Варьируя вышеуказанными факторами, можно воздействовать на величину возникающих напряжений в отливке.

Напряжения, действующие в некоторый момент в отливке, называют временными. Если напряжения таковы, что вызывают только упругие деформации, то после охлаждения и выравнивания температур они полностью снимаются. Если в отливке при некотором распределении температур происходят пластические деформации, то после охлаждения и выравнивания температур возникают остаточные

напряжения обычно обратного знака по сравнению с теми временными, которые были при высоких температурах.

Остаточные напряжения в литой заготовке могут совпасть с рабочими напряжениями в конструкции и вызвать ее разрушение при условиях, когда номинальные напряжения значительно меньше предела прочности материала. Кроме того, остаточные напряжения при длительном действии могут вызывать недопустимые для нормальной работы конструкции деформации (например, в деталях станков).

Внутренние временные напряжения, возникающие в процессе затвердевания и охлаждения отливки, делятся на усадочные, фазовые и термические. При этом величину и знак литейных напряжений можно определить, как алгебраическую сумму усадочных фазовых и термических напряжений:

$$\sigma_{\text{л}} = \sigma_{\text{у}} + \sigma_{\text{т}} + \sigma_{\text{ф}} \quad (1)$$

Литейные сплавы при различных режимах охлаждения отливок могут образовывать остаточные напряжения разной величины. Для их оценки применяются технологические пробы. Наиболее распространенные виды таких проб представлены на рис. 1. Все пробы основаны на том, что при охлаждении в их определенных частях возникают остаточные напряжения, которые после разрезки реализуются в виде деформаций. Измеряя деформации, можно определить величину напряжений, действовавших до резки.

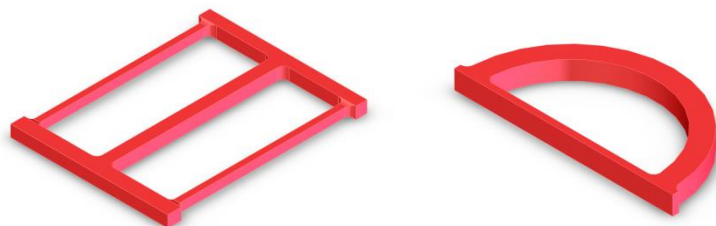


Рис. 1. Виды проб для определения остаточных напряжений

Типичной пробой являются рамка или скоба (рис. 1), состоящие из одного толстого бруска и одного или двух тонких, связанных в жесткую конструкцию. Вследствие того, что тонкие бруски охлаждаются быстрее, чем толстые, и усадка происходит больше, в них возникают растягивающие напряжения, а в толстых – сжимающие. Первоначально это вызывает в брусках упругие, а затем пластические деформации.

После полного охлаждения температура тонких и толстого брусков выравнивается. Достигнутые пластические сжимающие деформации в толстом и растягивающие в тонких брусках не дают им возможность вернуться к первоначальным размерам. В результате в толстом бруске образуются растягивающие, а в тонких – сжимающие остаточные напряжения.

После охлаждения на среднем толстом бруске делают две отметки, расстояние между которыми измеряется. Далее между отметками брусок разрезается. В результате остаточных растягивающих напряжений концы толстого бруска после разрезки расходятся. Измеряя расстояние между отметками и после разрезания, можно определить заторможенную упругую деформацию. Зная модуль упругости и размеры пробы, по деформации можно вычислить остаточное напряжение.

1.2 Усадочные напряжения.

Они вызываются механическим торможением со стороны формы при высоких температурах. В отливках из железных сплавов от температур ниже солидуса до 700 °С они компенсируются пластическими деформациями. Ниже 700 °С, ввиду возрастания упругости, они начинают накапливаться и достигают максимума при температуре около 200 °С, т. е. перед выбивкой. После извлечения из формы они обычно сжимаются. Особенно большое развитие усадочные напряжения получают при литье в металлические формы.

Для усадочных напряжений в бруске с фланцами можно написать

$$\sigma_y = \alpha_T E (T_0 - T), \quad (2)$$

где T_0 – исходная температура, которую условно можно относить к точке перехода из плоской зоны в другую; T – температура, до которой брусок охладился.

Величины α_T и E можно принимать как средние значения коэффициента усадки и модуля упругости в интервале $T_0 - T$.

Если считать, что пластическая деформация и податливость формы оцениваются относительно величиной $\Delta L/L$ (где L – длина бруска), то

$$\sigma_y = E \left[\alpha_T (T_0 - T) - \frac{\Delta L}{L} \right]. \quad (3)$$

Если принять для стали $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$, $E = 2 \cdot 10^6$ кгс/см² и $T_0 - T = 700$ °С, то при $\Delta L = 0$ получим для напряжения довольно большую величину $\sigma = 168$ кг/мм².

Если деформация ΔL составит хотя бы 0,5 % или 0,05, то напряжение снизится до 68 кг/мм².

Механическое торможение усадки возникает в отливках, имеющих внутренние полости и выступающие части (рис. 2), так как сокращение наружных размеров отливок встречает сопротивление формы.

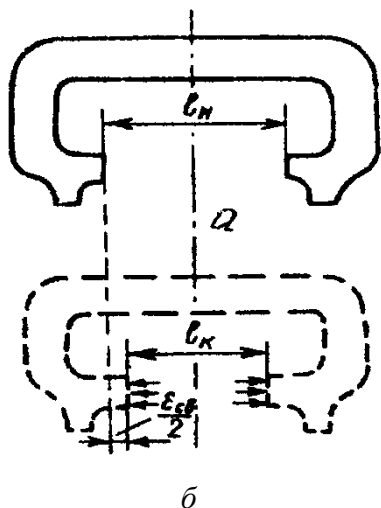


Рис. 2. Сопротивление усадке отливки в результате деформации формы на величину $l_n - l_k$

В зависимости от материала формы (песчаная смесь, металлический кокиль и т.д.) это сопротивление приблизительно характеризуют коэффициентом жесткости μ : для абсолютно податливых форм $\mu = 0$, для абсолютно жестких $\mu = 1$, а в общем случае $0 < \mu < 1$. Способность формы к деформированию под влиянием усилий, развиваемых отливкой при усадке, обратная ее жесткости определяет действительную усадку отливки $\epsilon_{отл}$ в отличие от свободной усадки $\epsilon_{св}$, которую можно получить только в абсолютно податливой форме:

$$\epsilon_{отл} = \epsilon_{св} (1 - \mu). \quad (4)$$

Нереализованная усадка металла, подавленная сопротивлением формы, является деформацией отливки e :

$$e = \epsilon_{св} - \epsilon_{отл} = \mu \epsilon_{св}. \quad (5)$$

В податливых формах ($\mu \approx 0$) деформация отливки минимальна ($e \approx 0$), в жестких формах ($\mu \approx 1$) деформация численно равна нереализованной (потенциально возможной) свободной усадке $e \approx \varepsilon_{св}$.

В области высоких температур, когда металл находится в пластическом состоянии, деформации e , превышающие предельную пластичность материала δ , вызывают появление трещин, называемых горячими, или кристаллизационными. Это связано с тем, что в температурном интервале кристаллизации $t_{л}-t_c$, когда дендритные кристаллы частично разделены прослойками жидкой фазы, пластичность металла резко снижается до 0,1–0,5 %; при этом даже незначительное торможение линейной усадки способно вызвать появление деформаций e , превышающих пластичность δ ,

$$e = \mu \varepsilon_{св} > \delta, \quad (6)$$

и тогда образуется горячая трещина.

В области низких температур, когда металл переходит в упругое состояние, деформации, вызванные торможением усадки, способствуют появлению так называемых усадочных напряжений: $\sigma_y = eE = \mu \varepsilon_{св} E = \alpha_T \mu E (t^* - t)$, где E – модуль упругости; t – текущая температура; $\varepsilon_{св}$ – потенциальная свободная усадка отливки с момента условного перехода металла из чисто пластического в идеально упругое состояние при температуре t^* . По мере понижения температуры отливки усадочные напряжения $\sigma_y(t)$ нарастают и достигают максимума после полного охлаждения ($t = t_k = 0$):

$$(\sigma_y)_{\max} = \alpha_T \mu E t^*. \quad (7)$$

Если величина $\sigma_y(t)$ в какой-то момент превысит предел прочности σ_b , произойдет разрушение и образуется так называемая холодная трещина.

Для уменьшения σ_y в отливках сложной конфигурации, испытывающих значительное механическое торможение усадки, важно не только снижать жесткость формы μ , но также извлекать отливку из формы при такой температуре выбивки t_b , когда σ_y не достигает σ_b , то есть

$$t_b > t^* - \frac{\sigma_b}{\alpha_T \mu E}. \quad (8)$$

Очевидно, что усадочные напряжения не возникают, если выбивку производить при $t_b > t^*$, однако при этом могут достигать опасной величины термические напряжения, поэтому необходимо выдерживать отливки в форме до некоторой оптимальной температуры.

1.3 Термические (температурные) напряжения.

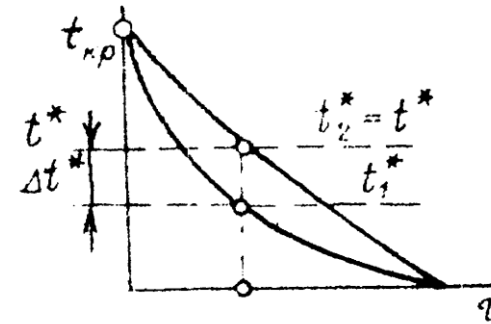
Они вызываются различной скоростью охлаждения и неравномерным протеканием усадочных процессов в различных частях отливки. Эти напряжения обычно имеют наибольшую величину.

Термическое торможение усадки возникает в результате взаимных деформаций при неравномерном охлаждении различных частей отливки сложной конфигурации. Массивные и тонкие части отливки затвердевают не одновременно и охлаждаются с различной скоростью, в результате чего между ними возникают перепады температур, величина которых сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается до нуля при полном охлаждении отливки. В зависимости от изменения температуры обе части отливки сокращают свои размеры на величину $(\epsilon_{св})_{1,2} = \alpha_t \Delta t_{1,2}$, где индексы 1 и 2 относятся к тонкой и массивной частям соответственно. Если бы они были не связаны и их усадка не зависела друг от друга, тогда она была бы равна свободной: $(\epsilon_{отл})_{1,2} = (\epsilon_{св})_{1,2}$. В связанной системе более интенсивное сокращение размеров одной части вызывает деформации сжатия в другой и, наоборот, приводит к появлению деформаций растяжения в первой. Эти деформации равны разнице между потенциальной свободной усадкой и действительной усадкой отливки как единого целого:

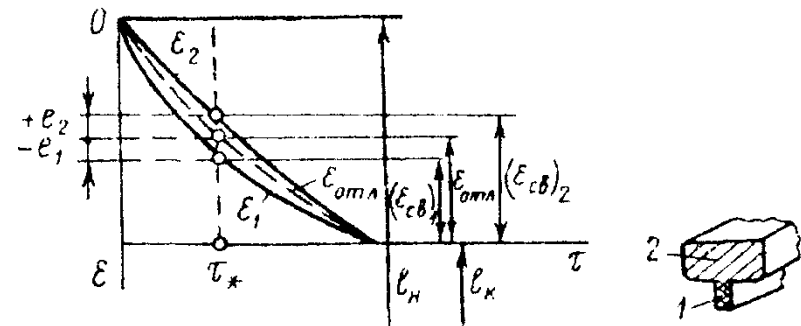
$$e_{1,2} = (\epsilon_{св})_{1,2} - \epsilon_{отл}. \quad (9)$$

В областях высоких температур ($t > t^*$) деформации носят пластический характер и не приводят к появлению напряжений ($E \approx 0$), хотя и вызывают снижение свойств металла в результате образования большого числа дислокаций в структуре. После перехода всей отливки в упругое состояние (на рис. 2, а с момента τ^* , когда $t_2 < t^*$) возникающие деформации приводят к появлению термических напряжений $(\sigma_t)_{1,2} = Ee_{1,2}$. С момента τ^* до полного остывания массивная часть отливки, охлаждаясь от t_2^* , получит большую свободную усадку $(\epsilon_{св})_2 = \alpha_t t_2^*$, чем тонкая $(\epsilon_{св})_1 = \alpha_t t_1$ (рис. 2, б), поэтому после полного охлаждения массивная часть будет согласно (9) растянута на величину $e_2 = \alpha_t t_2^* - \epsilon_{отл}$, так как усадка отливки за тот же период $\epsilon_{отл} < (\epsilon_{св})_2$. Соответственно тонкая часть при остывании от более низкой температуры t_1^* будет

сжата на величину $-e_1 = \alpha_t t_1^* - \varepsilon_{отл}$, так как $\varepsilon_{отл} > (\varepsilon_{св})_1$. Выражая $\varepsilon_{отл}$ через среднюю температуру в момент τ^*



а



б

в

Рис. 3. Изменение температуры (а) и усадки (б) тонкого (1) и массивного (2) брусков при охлаждении отливки сложного сечения (в)

$$\varepsilon_{отл} = \alpha_t \frac{t_1^* f_1 + t_2^* f_2}{f_1 + f_2}, \quad (10)$$

где f_1 и f_2 – сечения тонкого и массивного элементов, получим после несложных преобразований

$$(\sigma_{\tau})_{1,2} = \pm \frac{f_{2,1}}{f_1 + f_2} \alpha_{\tau} E \Delta t^*, \quad (11)$$

здесь $\Delta t^* = t_2^* - t_1^*$ – перепад температур в отливке в момент τ^* .

Таким образом, термические напряжения возникают в момент условного перехода отливки в упругое состояние, возрастающее по мере охлаждения, и достигают максимального значения (11) после полного выравнивания температур. Величина σ_{τ} определяется перепадом температур Δt^* , то есть неравномерностью охлаждения различных частей отливки, а распределение напряжений зависит от соотношения площадей их сечения f_1 и f_2 . Отливки из материала с большим модулем упругости E имеют более высокий уровень остаточных напряжений.

Уменьшение теплопроводности сплава увеличивает градиент температуры по сечению отливки и, следовательно, уровень напряжений I рода. Очевидно также влияние температурного коэффициента линейного расширения α_{τ} на уровень напряжений I рода. В результате α_{τ} структурных составляющих могут возникать также термические напряжения II рода. Анализ процесса возникновения термических напряжений показал, что остаточные напряжения не зависят от размеров отливки и пропорциональны различию сечений элементов отливки. При этом в толстых сечениях развиваются растягивающие напряжения, в тонких – сжимающие.

Радикальное устранение внутренних и остаточных напряжений достигается при создании равностенных конструкций или при охлаждении всех частей отливки с одинаковыми скоростями.

При выбивке отливок резко возрастает различие скоростей охлаждения частей отливок неодинакового сечения, следовательно, возрастают внутренние напряжения. В качестве примера можно привести величины напряжений во втулках из ковкого чугуна при различных температурах выбивки (табл. 1).

Наиболее действенной мерой устранения остаточных напряжений является отжиг отливок.

Для его осуществления необходимо нагреть отливку до температур, при которых металл приобретает достаточно высокую пластичность, выдержать ее до тех пор, пока напряжения не снизятся до допустимой величины, и медленно охладить отливку, чтобы не вызвать новых напряжений.

Таблица 1

Зависимость остаточных напряжений от температуры выбивки

Температура выбивки, °С	Напряжение, кгс/мм ²	
	сжимающее	растягивающее
500	5,0	8,0
300	2,5	4,5
20	1,0	1,0

Для большинства сталей и чугунов температура, при которой пластические напряжения переходят в упругие, лежит около $T_y = 620\text{--}650$ °С. Из табл. 2 следует, что при выдержке отливок из среднеуглеродистой стали в течение шести часов при увеличении температур отжига степень снятия остаточных напряжений резко возрастает.

Таблица 2

Зависимость степени снятия напряжений от температуры термообработки

Температура обработки, °С	200	400	500	550	600
Снятие напряжений, %	2–3	20	50	70	95

Скорость охлаждения отливок с печью обычно составляет 6–12 °С/ч, температура выгрузки из печи – 250–300 °С.

Приближенные расчеты усадочных напряжений проводят по формуле

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{св}}{\frac{1}{E_0} + \frac{F_0}{F_\phi} \frac{1}{E_\phi}} = \alpha \frac{T_{н.х} - T}{\frac{1}{E_0} + \frac{F_0}{F_\phi} \frac{1}{E_\phi}} \quad (12)$$

где F_0 , E_0 – площадь поперечного сечения, м², и модуль упругости, МПа, материала отливки; F_ϕ , E_ϕ – площадь сжимаемого слоя, м², формы и модуль деформации, МПа, формовочной смеси; α – коэффициент усадки сплава отливки, 1/К.

Это выражение не учитывает существенных факторов, заметно влияющих на уровень напряжений, поэтому используется только для качественного анализа возможного процесса развития напряжений в зависимости от учитываемых факторов.

Для сплавов на основе железа существенными являются фазовые напряжения, которые в разные периоды охлаждения отливки могут повышать и снижать усадочные и термические напряжения. Способов расчета и экспериментального определения чисто фазовых напряжений нет, так как они всегда связаны с изменением температуры и, следовательно, с возникновением или усадочных, или термических напряжений. Однако влияние их на уровень усадочных напряжений в простейших отливках фиксируется экспериментально и учитывается при расчетах.

Формула для расчета внутренних напряжений, возникающих в прутке с заторможенными концами, σ_T , МПа, выведена аналитически с учетом экспериментальных измерений (В. И. Швецов, В. М. Александров), проведенных на образцах из стали 15Л, 110Г13Л и 30ХНМЛ, а также из сплава АК9

$$\sigma_T = \alpha \epsilon K (1 - n) (T_{H.T} - T)^3 \tau^{-1}, \quad (13)$$

где α и ϵ – коэффициенты температурной зависимости соответственно модуля упругости и усадки сплава отливки, МПа/К.

$$E = \epsilon (T_{H.Y} - T), \quad (14)$$

$$\epsilon_{св} = \alpha (T_{H.Y} - T). \quad (15)$$

При полном торможении усадки, что является характерным в начале формирования отливки в любой форме, $n = 0$ и означает численное равенство суммы упругой и пластической деформации величине свободной усадки.

1.4 Фазовые напряжения.

Они вызываются выделением или исчезновением различных фаз или структурных составляющих при охлаждении отливки, имеющей удельный объем, отличный от матрицы. При различных скоростях охлаждения и в различных частях отливок фазовые превращения протекают в разное время. Это и вызывает фазовые напряжения в отливке в целом.

Фазовые напряжения вызываются выделением или исчезновением различных фаз или структурных составляющих при охлаждении отливки. Возникновение и уровень напряжений определяются:

- различием удельных объемов фаз;

- упругими и пластическими свойствами матрицы сплава (т.е. основной структурной составляющей);

-последовательностью протекания фазового превращения в объёме отливки (из-за наличия градиента температур фазовые превращения протекают, как правило, не одновременно).

В табл. 3 представлены данные о плотности, и удельном объёме различных структурных составляющих железоуглеродистых сплавов.

Таблица 3.

Плотность и удельный объем структурных составляющих железоуглеродистых сплавов

Свой- ство	Структурные составляющие					
	Феррит	Цементит	Аустенит с 0,9% С	Перлит с 0,9% С	Мартенсит с 0,9% С	Графит
Плот- ность, г/см ³	7,8640	7,6700	7,8430	7,7780	7,6330	2,2500
Уд.объе м, см ³ /г	0,1271	0,1304	0,1275	0,1280	0,1310	0,4450

При различных скоростях охлаждения в различных частях отливки фазовые превращения протекают в разное время. Это и вызывает фазовые напряжения в отливке в целом.

При медленном охлаждении стальной отливки распад аустенита с образованием перлита протекает при высоких температурах. Происходящее при этом увеличение удельного объёма с 0,1275 до 0,1286 см³/г может компенсироваться пластическими деформациями. При увеличении скорости охлаждения превращение будет происходить при более низких температурах в зоне упругих деформаций и может вызвать ощутимые напряжения. При более быстром охлаждении образуется мартенсит, обладающий значительной разницей удельных объёмов по сравнению с аустенитом. Если мартенсит образуется в поверхностном слое, а в средней части не образуется, то это вызовет растягивающие напряжения в центре отливки и сжимающие - на поверхности.

В чугуновых отливках выделение графита будет происходить в массивных частях с существенным увеличением удельного объёма. При этом растягивающие напряжения возникают в поверхностном слое, сжимающие - в середине сечения.

Наиболее опасны фазовые превращения в высоколегированных сталях с мартенситной матрицей, в отбеленных чугунах с ледебурит-

ной матрицей и в жаропрочных сплавах, содержащих большое количество интерметаллидов.

При медленном охлаждении стальной отливки распад аустенита с образованием перлита происходит при более высоких температурах. Происходящее при этом увеличение удельного объема может компенсироваться пластическими деформациями. При более быстром охлаждении повреждение будет происходить при более низких температурах в упругой зоне и может вызвать ощутимые напряжения. При еще более быстром охлаждении (закалке) образуется мартенсит, обладающий значительной разницей удельных объемов в сравнении с аустени- том. Если мартенсит в поверхностном слое образуется, а в средней части нет, то это вызовет растягивающее напряжение в центре и сжимающее на поверхности.

В случае чугунных отливок выделение графита будет происходить в массивных частях с существенным возрастанием удельного объема. При этом растягивающие напряжения возникнут в поверхностном слое, а сжимающие – в середине сечения.

Для сплавов на основе железа, претерпевающих полиморфные превращения, выражение (13) используют только до температуры начала превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, поскольку коэффициенты α и ν в α -области заметно уменьшаются. Кроме того, в переходном интервале существенное влияние на деформацию оказывает перлитное расширение $\varepsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}$. Поэтому при определении напряжений в переходной области рассчитывают величину упругой деформации ε_y при температуре $T_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$ из условия

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_{T^H}}{E_{T^H}} - \varepsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}, \quad (16)$$

а затем уровень напряжений к концу переходного периода при $E_{T^K} = \nu_{\alpha}(T_{H.Y} - T_{\gamma \rightarrow \alpha}^K)$

$$\sigma_{T^K} = \left(\frac{\sigma_{T^H}}{E_{T^K}} - \varepsilon_{\gamma \rightarrow \alpha} \right) E_{T^H}. \quad (17)$$

Здесь σ_{T^H} и σ_{T^K} – уровень напряжений при температурах начала и конца превращения $\gamma \rightarrow \alpha$; E_{T^H} и E_{T^K} – значения модуля упруго-

сти материала отливки при температурах начала и конца превращения, полученные расчетом по выражению (14).

В зависимости от величины перлитного расширения $\varepsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}$ напряжения могут снижаться вплоть до отрицательных значений (до противоположного знака – сжатия), если концы прутка закреплены жестко. При дальнейшем охлаждении отливки уровень напряжений изменяется с температуры начала торможения в α -области по известному закону Гука с учетом изменения температуры

$$\sigma_T = \alpha_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} (1 - n) (T_{H.T}^{\alpha} - T_0)^2, \quad (18)$$

где $T_{H.T}^{\alpha}$ – температура начала торможения усадки в α -области.

$$T_{H.T}^{\alpha} = \frac{\left(\frac{\alpha_{\alpha} T_{\gamma \rightarrow \alpha}^K - \sigma_{T^K}}{E_{T^K}} \right)}{\alpha_{\alpha}}. \quad (19)$$

В α -области релаксацией напряжений пренебрегаем в силу малого значения и небольшой продолжительности при температурах ниже температуры перехода в упругое состояние.

В отливке с переменным сечением расчет напряжений усложняется неодновременным протеканием фазовых превращений в участках.

Таким образом, описанный способ позволяет рассчитать уровень усадочных напряжений с учетом влияния фазовых превращений. Точность расчета зависит, главным образом, от точности определения характеристик сплава и затрудненной усадки отливки. По этой методике можно определить уровень напряжений в элементах прутка переменного сечения, а также в элементах решетки.

Термические напряжения рассчитывают только в охлажденной отливке типа решетки как результат остаточных пластических деформаций, возникающих при неравномерном охлаждении разных элементов отливки в период перехода от пластического состояния к упругому.

$$\left\{ \sigma_1 = -E \frac{F_2}{F_1 + F_2} \alpha (T_{2V} - T_{1V}), \right. \quad (20)$$

$$\left. \sigma_2 = E \frac{F_1}{F_1 - F_2} \alpha (T_{2V} - T_{1V}), \right\} \quad (21)$$

где T_{1y} и T_{2y} – температуры брусков (элементов) в момент перехода второго медленно охлаждаемого элемента в упругое состояние, К; E – модуль упругости материала полностью охлажденной отливки, МПа.

Эти напряжения измеряются экспериментально путем фиксирования упругой деформации в растянутом элементе. Однако в этом случае должно учитываться фазовое превращение, которое в зависимости от режимов охлаждения элементов может усиливать или ослаблять термические напряжения вплоть до противоположного знака, что часто вносит неразрешимые недоразумения при определении упругих деформаций.

1.5 Коробление отливок.

Коробление отливок возникает в результате неравномерного охлаждения и усадки их элементов, переходящей в пластические деформации.

Неравномерность охлаждения вызывается различными размерами сечений или различными условиями теплоотвода от элементов отливки, образующих единую связанную систему.

В качестве примера приведем схемы коробления отливки типа бруска с неравномерным сечением (рис. 4, *а*) и плиты (рис. 4, *б*).

В результате ускоренного охлаждения тонкой части бруска он будет изгибаться сначала толстой частью наружу, а при ускоренном охлаждении плоской плиты по периметру она также будет соответствующим образом изгибаться. Если изгиб, вызванный неравномерным охлаждением, не выйдет из пределов других деформаций, то отливки после охлаждения примут первоначальную форму. Однако очень часто деформация приобретает пластический характер, и первоначальная форма после охлаждения не восстанавливается, приобретая обратный знак по сравнению со схемами, приведенными на рис. 4. В этом случае отливки нуждаются в исправлении их формы при помощи механического деформирования (правка).

В качестве основных мероприятий по предотвращению коробления отливок используются следующие:

- создание отливок с одинаковой толщиной всех ее связанных элементов, обеспечивающей равную скорость их охлаждения;
- применение ребер жесткости, препятствующих короблению;
- ускоренное охлаждение массивных частей отливки при помощи холодильников или иными методами.

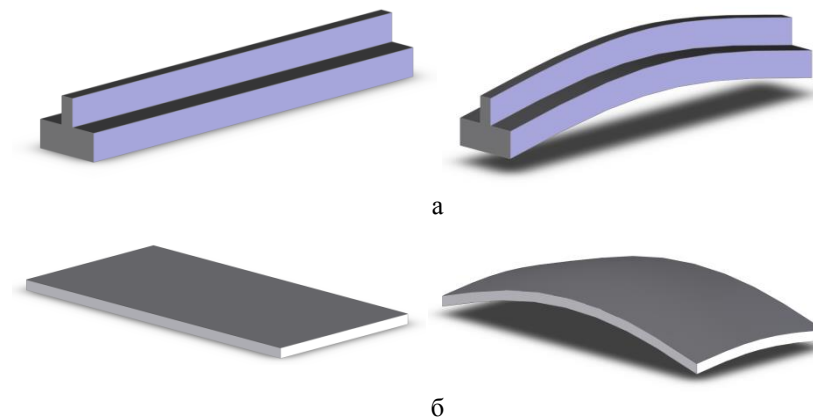


Рис. 4. Схемы коробления отливок в процессе охлаждения:
а - с неравномерным сечением,
б – плоская плита

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для оценки значения остаточных напряжений применяются технологические пробы, наиболее распространенные виды которых представлены на рис.5.

Пробы основаны на том, что при охлаждении в определенных частях их возникают остаточные напряжения, которые после разрезки по этим местам реализуются в виде деформаций. Измеряя деформации, можно определить значения напряжений, действующих до разрезки.

Типичной пробой является рамка (рис. 5а), состоящая из двух тонких брусков сечением 10 x 15 мм и одного толстого сечением 20 x 20 мм, связанных перекладинами в жесткую конструкцию.

При охлаждении рамки температура по системе распределяется неравномерно: перемещение тепла осуществляется за счет теплопроводности тела. Однако решающим фактором является отвод тепла в атмосферу. Если отвод высокий, тепло не успевает перетекать из внутренних зон к наружным. Когда охлаждение замедляется, отток тепла наружу ослабевает, и температура по сечению выравнивается.

В начальный период более интенсивно охлаждаются тонкие бруски; достигается максимальная разность в скоростях охлаждения тон-

ких и толстого брусков, а затем скорость толстого бруска превалирует над скоростью охлаждения тонких брусков. До комнатной температуры бруски охлаждаются практически одновременно. Достигнутые пластические сжимающие деформаций в толстом и растягивающие в тонких брусках не дают им возможности вернуться к первоначальным размерам. В результате в толстом бруске образуются растягивающие, а в тонких сжимающие остаточные напряжения.

После окончательного охлаждения на среднем толстом бруске делают две отметки, расстояния между ними измеряются и далее между отметками разрезается. Из-за наличия остаточных растягивающих напряжений концы толстого бруска после разрезки расходятся. Изменяя расстояния между отметками после разрезки, можно определить заторможенную упругую деформацию.

Зная модуль упругости и размеры пробы, по деформации определяются остаточные напряжения по формулам:

$$\sigma_1 = - \frac{(l-l')E}{L(1+\frac{2F_1}{F_2})}, \quad (22)$$

$$\sigma_2 = + \frac{(l-l')E}{L(1+\frac{F_2}{2F_1})}, \quad (23)$$

где σ_1 и σ_2 - остаточные напряжения соответственно в тонком и толстом брусках, МПа; l и l' - расстояние между отметками до и после разрезки толстого бруска, мм; E - модуль упругости, МПа, L - длина толстого бруска до разрезки, мм; F_1 и F_2 - площади поперечного сечения соответственно тонкого и толстого брусков, мм².

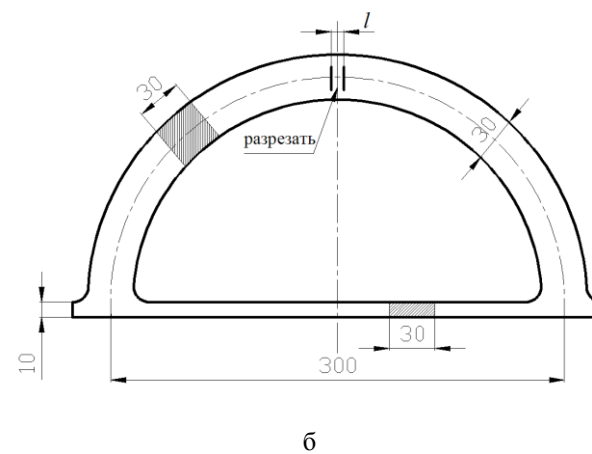
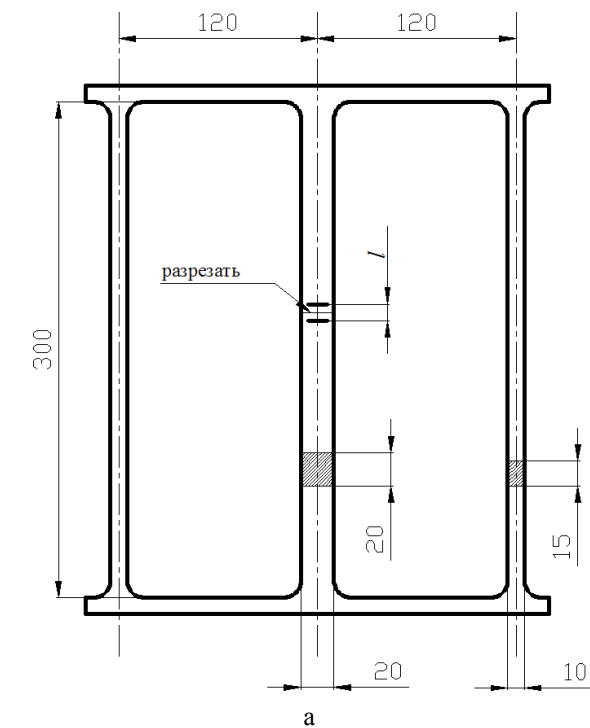


Рис. 5. Пробы для определения остаточных напряжений в отливках: а- рамка, б - скоба.

3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы следующие приборы и оборудование:

- печь для плавки алюминиевых сплавов;
- заливочный ковш;
- алюминиевый сплав;
- формовочная смесь для формовки по-сырому;
- формовочный инструмент;
- комплекты опок;
- модель технологической пробы;
- микроскоп МПБ-3;
- электронный потенциометр;
- термопара хромель-алюмель;
- ножовка по металлу;
- тисы слесарные;
- штангенциркуль.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Приготовить формовочную смесь.
2. Изготовить три литейные формы с технологическими пробами.
3. Расплавить алюминиевый сплав, довести его до заданной температуры (760 - 780°C).
4. Залить формы.
5. Первую форму выбить сразу после затвердевания металла в литейнике и охладить пробу в воде.
Вторую форму выбить после пятиминутной выдержки и охладить на воздухе.
Третью форму выбить после 20 - 25 мин. выдержки.
6. На толстом бруске нанести две риски на расстоянии 4 - 5 мм друг от друга и измерить расстояние между рисками (l) с помощью микроскопа МПБ - 3.
7. Замерить общую длину толстого бруска (L).
8. Распилить толстый брусок между рисками.
9. Замерить расстояние между рисками (l') в распиленном бруске с помощью микроскопа МПБ - 3.
10. Выполнить расчет остаточных напряжений в тонких и толстом

брусках, используя формулы (3) и (4). Значения модуля упругости E для различных сплавов следующие:

11. - для серого чугуна 75 - 100 МПа;
12. - для сталей 200 МПа;
13. - для алюминиевого сплава 70 - 75 МПа.
14. Данные замеров и расчетов оформить в виде табл. 4.

Таблица 4
Результаты определения остаточных напряжений

№ пробы	Условия охлаждения	Температура заливки, °С	Расстояния между рисками, мм		Напряжения, МПа	
			До разрезки	После разрезки	В толстом бруске σ_1	В тонком бруске σ_2
1	В воде					
2	На воздухе					
3	В форме					

Проанализировать зависимость остаточных напряжений от скорости охлаждения отливки и сделать общие выводы.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете по лабораторной работе должны быть представлены следующие материалы:

- краткая теоретическая часть;
- эскиз технологической пробы для определения остаточных напряжений;
- схема деформации пробы после окончательного ее охлаждения;
- формулы расчета напряжений;
- результаты экспериментов;
- выводы и рекомендации об организации технологии изготовления отливок с минимальными значениями остаточных напряжений.

Для защиты лабораторной работы необходимо усвоить материал по теме «Литейные напряжения в отливках в отливках», «Горячие и холодные трещины в отливках».

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы причины возникновения напряжения в отливках?
2. На какие виды делятся временные напряжения?
3. Чем вызвано образование усадочных напряжений?
4. Каковы причины образования фазовых и термических напряжений?
5. Какие виды брака, связанные с напряжением в отливках, вы знаете и каковы методы их предотвращения, устранения?
6. Как влияет скорость охлаждения на величину и распределения напряжения в отливках?
7. Каким образом напряжение зависит от хим. Составы сталей?
8. При каких условиях напряжения равны нулю?
9. Каким образом можно воздействовать на величину напряжений в отливках?
10. Какие факторы влияют на величину напряжений?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория литейных процессов: учебник / В.Д. Белов [и др.]; под ред. Хосена Ри. – Хабаровск: Изд-во «РИОТИП» краевой типографии, 2008. – 580 с.
2. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: Учеб. / Под ред. Э.Б. Гофмана. – Екатеринбург, 2006. – 454с.
3. Гуляев В.Б. Теория литейных процессов. Учебное пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1976. - 216 с.
4. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. Учебное пособие для металлургических вузов и факультетов. М.: Машиностроение, 1976. - 216 с.
5. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства. – МАШГИЗ, 1961. - 448 с.
6. Пржибл Й. Теория литейных процессов. – М.: Мир, 1967. – 328 с.