РАБОТА 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОТЛИВКАХ

Цель работы: изучение закономерностей формирования литейных напряжений при затрудненной усадке отливки.

Задачи работы: 1. Наблюдать наличие остаточных литейных напряжений в отливке специальной формы (пробы).

2. Определить значение остаточных литейных напряжений в отливке.

3. Исследовать закономерности кинетики затрудненной усадки отливки.

4. Исследовать закономерности кинетики затрудненной усадки отливки в сопоставлении с кинетикой свободной усадки.

Введение

В отливках при охлаждении возникают термические $\sigma_т$, фазовые $\sigma_ф$ и усадочные $\sigma_у$ напряжения, в сумме составляющие литейные напряжения $\sigma_л = \pm\sigma_т \pm \sigma_ф \pm \sigma_у$.

Термические напряжения $\sigma_т$ образуются в результате неравномерного охлаждения и соответственного усадки различных частей отливки после перехода металла из пластического состояния в упругое. В области высоких температур, когда металл находится в пластическом состоянии, неравномерная усадка вызывает образование пластических деформаций, которые в силу значительной скорости релаксации не приводят к появлению напряжений. В начальный пери-

од быстрее охлаждаются тонкие части (наружные слои) отливки, в результате чего возникает и увеличивается со временем перепад температур в отливке. Последующее охлаждение вызывает выравнивание температур, т.е. более быстро начинают охлаждаться массивные части (внутренние слои) отливки вплоть до полного остывания всех частей – достижения температуры окружающей среды. Та часть отливки, которая охлаждается быстрее, получает деформации растяжения, поскольку встречает при этом сопротивление более медленно охлаждающихся элементов. Поэтому с момента перехода всей отливки в упругое состояние возникают и непрерывно увеличивается по мере охлаждения термические напряжения (упругие деформации), достигающие максимального значения после полного охлаждения, причем остаточные напряжения в массивных частях (внутренних слоях) являются растягивающие ($\sigma_т > 0$), а в тонких (наружных) – сжимающими ($\sigma_т < 0$).

Упругая деформация e отдельного волокна в неограниченном бруске произвольного поперечного сечения (рисунок 11.1, *а*) определяется разницей его свободной усадки $\varepsilon_{св} = \alpha_т \Delta t$ и действительной усадки бруска $\varepsilon_{отл} = \alpha_т \Delta t_{ср}$ с момента перехода бруска в упругое состояние:

$$e\,(x) = \varepsilon_{св}(x) - \varepsilon_{отл}. \qquad (11.1)$$

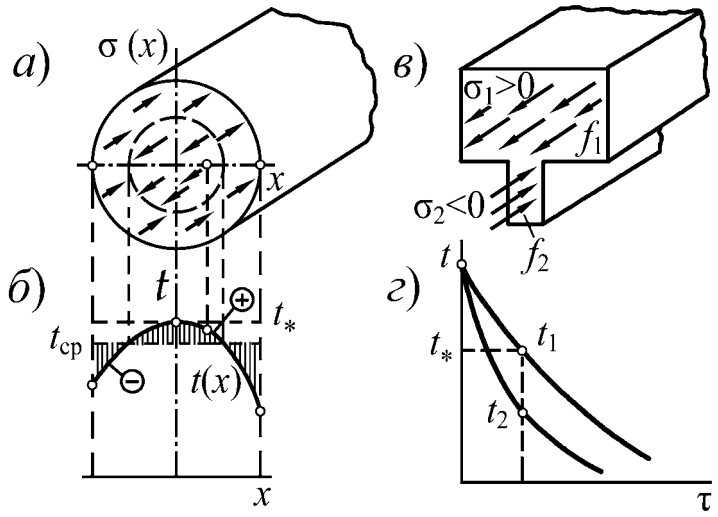

Рисунок 11.1 – Схема формирования напряжений в отливках

После полного охлаждения отливки остаточные термические напряжения в выделенном волокне определяются выражением

$$\sigma_т(x) = E\,e(x) = E\,[\varepsilon_{св}(x) - \varepsilon_{отл}] = \alpha_т E\,[t(x) - t_{ср}],$$

где $\alpha_т$ – коэффициент усадки в твердом состоянии; E – модуль упругости металла; $t(x)$, $t_{ср}$ – температура рассматриваемого элемента и средняя температура по сечению бруска в момент перехода в упругое состояние ($t \le t_*$) термического центра; t_* – условная температура перехода металла из пластического состояния ($E = 0$ при

$t > t_*$) в упругое. Те волокна, у которых $t(x) > t_{ср}$, после полного охлаждения отливки оказываются растянутыми ($\sigma_т > 0$), и наоборот (рисунок 11.1, *б*).

Для сложной отливки, состоящей из двух брусков – массивного сечением f_1 и тонкого сечения f_2 (рисунок 11.1, *в*), можно рассчитать $t_{ср}$ из очевидного соотношения

$$t_{ср} = \frac{t_1 f_1 + t_2 f_2}{f_1 + f_2},$$

подстановка которого в формулу для $\sigma_т$ приводит к выражению

$$(\sigma_т)_{1,2} = \pm\alpha_т E \frac{f_{2,1}}{f_1 + f_2}(t_1 - t_2), \qquad (11.2)$$

где t_1, t_2 – средние температуры массивного и тонкого брусков в момент перехода массивного бруска в упругое состояние ($t_1 = t_*$).

Таким образом, остаточные термические напряжения (11.2) в сложной отливке зависят от соотношения сечений f_1 и f_2 и являются растягивающими в массивном ($\sigma_т > 0$) и сжимающими в тонком ($\sigma_т < 0$) бруске.

Усадочные напряжения $\sigma_у$ возникают в результате торможения усадки формой в области упругого состояния металла и являются всегда растягивающими ($\sigma_у > 0$). Выбивка отливки приводит к ликвидации усадочных напряжений ($\sigma_у = 0$).

Фазовые напряжения $\sigma_ф$ образуются при неравномерном охлаждении различных частей (наружных и внутренних слоев) отливки, если фазовое превращение в твердом состоянии протекает в температурном интервале упругого состояния металла ($t_{пр} < t_*$). Величина и знак фазовых напряжений зависит от неодновременного протекания превращения в массивной и тонкой части ($\sigma'_ф < 0, \sigma''_ф > 0$) и неоднородности образующейся структуры продуктов превращения.

Для исследования кинетики развития деформаций в отливках применяются специальные пробы (рисунок 11.2), состоящие из элементов (брусков) различного сечения, неравномерное охлаждение которых приводит к возникновению литейных напряжений. Проба, представленная на рисунке 11.2, имеет тонкую стяжку *7* сечением F_1 и массивную дугу *3* сечением F_2 ($F_2 = 3F_1$) и заливается чугуном в горизонтальном положении через стояк *4*, расположенный в средней части дуги. При изготовлении формы для регистрации температуры устанавливаются две термопары: *5* – в центре сечения дуги на равном удалении от стояка и стяжки и *6* – в центре сечения стяжки посередине ее длины.

Для регистрации линейных изменений стяжки, происходящих как в результате ее усадки при охлаждении отливки, так и под влиянием усилий, разви-

ваемых дугой при изменении ее размеров в процессе остывания, в торцевые участки стяжки устанавливаются датчики усадки *2*, конструкция которых описана в работе 9. Перемещения регистрирующих стержней датчиков отмечаются с помощью стрелочных индикаторов *1*.

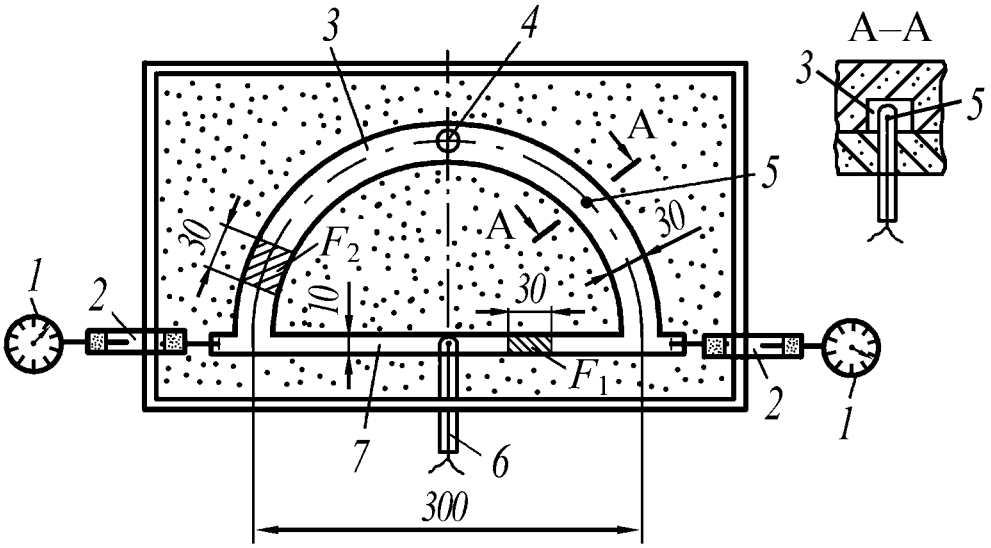

Рисунок 11.2 – Литейная форма для исследования кинетики затрудненной усадки отливки и формирования литейных напряжений

Порядок выполнения работы

Задание 1. Наблюдение наличия остаточных литейных напряжений в отливке.

1. Залить форму (рисунок 11.2) исследуемым сплавом. Термопары и датчики линейных перемещений в форме не устанавливать.

2. После затвердевания и остывания отливку выбить из формы.

3. Убедиться в наличии остаточных литейных напряжений в отливке. Для этого сначала с помощью наждачной бумаги зачистить в средней части стяжки площадку длиной 10…15 мм, которую затем обработать шлифовальной бумагой до получения шлифа. На поверхности шлифа провести перпендикулярно оси стяжки два параллельных штриха на расстоянии около 5 мм друг от друга и измерить это расстояние l_1 с помощью измерительного микроскопа с точностью до 0,05 мм как среднее арифметическое из трех замеров. Затем стяжку разрезать между штрихами с помощью механической ножовки. При этом образец освобождается от внутренних напряжений за счет реализации соответствующих упругих деформаций, значение которых ΔD определяют путем измерения расстояния между штрихами l_2 после разрезки стяжки: $\Delta D = l_2 - l_1$. Отличное от нуля значение ΔD свидетельствует о наличии в отливке остаточных напряжений. Знак ΔD указывает на тип напряжений: растяжение ($\Delta D > 0$) или сжатие ($\Delta D < 0$).

Задание 2. Определение значения остаточных литейных напряжений в отливке.

1. Залить форму (рисунок 11.2) исследуемым сплавом и определить значение упругой деформации ΔD (задание 1).

2. Определить усилие P в стяжке до ее разрезки. Связь между деформацией ΔD и усилием P описывается формулой сопротивления материалов, учитывающей упругую деформацию стяжки под влиянием силы P и изгибающего момента PR дуги:

$$\Delta D = \frac{P}{E}\left(\frac{\pi R^3}{2J_2} + \frac{2R}{F_1}\right),$$

где R – радиус кривизны массивной дуги; J_2 – момент инерции сечения F_2 дуги; E – модуль упругости материала отливки.

При известном значении модуля упругости E сила P может быть определена по известной деформации ΔD с последующим расчетом остаточных напряжений в стяжке σ_1 и дуге σ_2

$$\sigma_1 = P/F_1,\ \sigma_2 = PR/W_2, \qquad (11.3)$$

где W_2 – момент сопротивления изгибу сечения F_2 дуги.

Однако модуль упругости материала с необходимой точностью заранее не известен, поэтому для определения силы P применяют специальный прибор (рисунок 11.3).

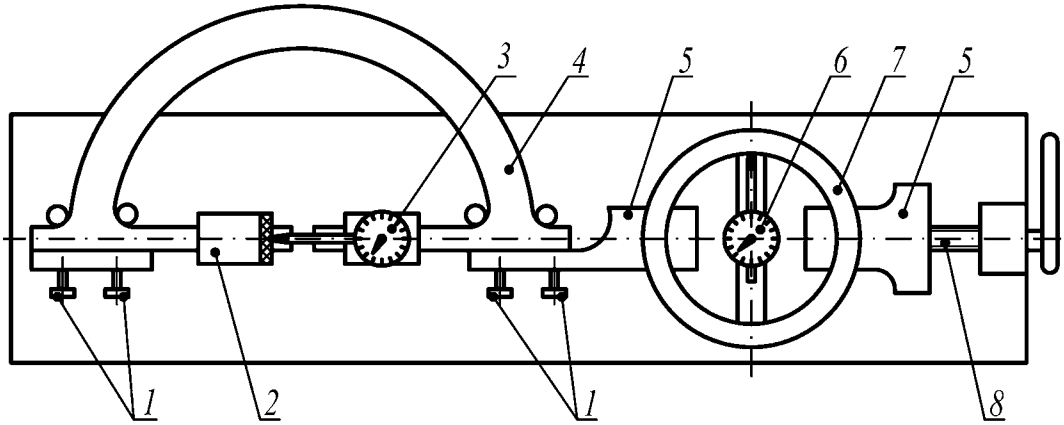

Рисунок 11.3 – Прибор для определения усилия в образце

На этом приборе с помощью винтов *1* закрепляют разрезанный образец *4* и деформируют (растягивают или сжимают) его винтом *8* в обратном направлении на величину ΔD, которая фиксируется индикатором *3*, установленным вместе с упорной площадкой *2* с помощью крепежных винтов на рассеченных концах стяжки. При этом усилие, которое необходимо для такой деформации, будет равно силе P, действовавшей в образце до его разрезки. Силу P определяют с помощью тарировочного графика по деформации, фиксируемой индикатором *6* кольцевого динамометра *7*, помещаемого между подвижными головками *5* прибора.

Задание 3. Исследование закономерностей кинетики затрудненной усадки отливки.

1. Залить форму (рисунок 11.2) исследуемым сплавом. В форме должны быть установлены термопары и датчики линейных перемещений.

2. Порядок работы при записи затрудненной усадки стяжки одинаков с методикой регистрации свободной усадки бруска (работа 9). Показания индикаторов записывают в течение 75…90 мин, после чего отливка охлаждается в форме до полного остывания.

3. После выбивки определить усилие P в стяжке до ее разрезки (задание 2).

Задание 4. Исследование закономерностей кинетики затрудненной усадки отливки в сопоставлении с кинетикой свободной усадки.

1. Получить временные зависимости температуры и затрудненной усадки стяжке (задание 3).

2. Одновременно тем же металлом залить две другие формы для исследования независимой (от стяжки) усадки скобы и свободной усадки стяжки. Для этого в форме заполняют формовочной смесью в первом случае отпечаток стяжки, а во втором – отпечаток дуги. Вести запись усадки скобы и стяжки, а также температуры в них, как это делалось при регистрации свободной усадки бруска (работа 9).

Обработка опытных данных

1. По измеренным расстояниям между штрихами l_1 и l_2 рассчитать значение упругой деформации ΔD.

2. По полученному значению усилия P в стяжке до ее разрезки рассчитать напряжения в дуге и стяжке по формулам (11.3).

3. По данным опыта графически представить зависимости затрудненной усадки стяжки $\varepsilon_{отл}(\tau)$ и изменения температуры в стяжке $t_1(\tau)$ и дуге $t_2(\tau)$ от времени, по которым построить сводный график развития усадки $\varepsilon_{отл}(t)$ (аналогично тому, как это делалось в работе 9). Для наглядного выявления того факта, что соотношение скоростей охлаждения массивного (дуга) и тонкого (стяжка) брусков изменяется на обратное в процессе охлаждения, построить также график изменения во времени разности температур $\Delta\, t\,(\tau) = t_2(\tau) - t_1(\tau)$, которая достигает максимума в момент равенства скоростей охлаждения обоих брусков.

4. Путем сопоставления затрудненной усадки $\varepsilon_{отл}$ со свободной усадкой $\varepsilon_{св}$ бруска, форма и размеры которого соответствует стяжке, определить согласно уравнению (11.1) значение и знак деформации e в стяжке. Воспользовавшись данными о свободной усадке $\varepsilon_{св}(t)$, нанести их в том же масштабе на график

$\varepsilon_{отл}(t)$ и по разности ординат обеих кривых рассчитать $e(t)$. Аналогично рассчитать $e(t)$ для дуги.

5. Экстраполяцией кривой $e(t)$ до температуры окружающей среды найти графически остаточную деформацию в пробе. Задаваясь значением t_* – температуры перехода металла в упругое состояние (для чугуна $t_* \approx 620…650$ °С), выделить на графике область упругих деформаций отливки и найти значение остаточной упругой деформации, накопленной с момента перехода отливки в упругое состояние до ее полного охлаждения $e_{отл}$.

Составление отчета

1. В отчете записать цель и задачи работы, сформулировать основные теоретические положения, используемые для анализа возникновения напряжений в отливках.

2. Привести схему экспериментальной установки, указать тип исследуемого сплава.

3. Описать полученные на графиках зависимости.

4. Провести анализ полученных данных, обратив внимание на особенности усадки и деформаций отливки в период протекания предусадочного расширения и фазового превращения в твердом состоянии, сопоставить ход кривой $e(t)$ с изменением перепада температур между брусками, сравнить остаточную деформацию $e_{отл}$, найденную графически, с измеренной экспериментально величиной ΔD.

5. Выполнить анализ особенностей развития затрудненной усадки отливки в сравнении с ее свободной усадкой и кинетики изменения деформаций в процессе охлаждения, представляющей с учетом температурной зависимости модуля упругости $E(t)$ кинетику развития литейных напряжений в исследуемой пробе.

6. Сформулировать установленные закономерности возникновения литейных напряжений в отливке.