

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ

Допущено Учебно-методическим объединением по
образованию в области металлургии в качестве учеб-
ного пособия для студентов высших учебных заведе-
ний, обучающихся по направлению «Металлургия»,
17.12.2013

Красноярск
СФУ
2014

УДК 621.746(07)
ББК 34.612я73
О-753

Рецензент:

Л. А. Оборин, кандидат технических наук, профессор,
советник генерального директора ОАО «Красмаш» по науке и технике

Авторы:

Т. Р. Гильманшина, В. Н. Баранов, В. Г. Бабкин, А. М. Синичкин,
А. И. Безруких, Е. М. Лесив, С. И. Лыткина

О-753 **Основы теории формирования отливки** : практикум /
Т. Р. Гильманшина, В. Н. Баранов, В. Г. Бабкин [и др.]. – Красно-
ярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 148 с.
ISBN 978-5-7638-2965-5

Практикум состоит из двух разделов. В первом разделе представлены лабораторные работы. В каждой работе приведены краткие теоретические сведения, используемое оборудование и методика обработки полученных экспериментальных данных.

Второй раздел посвящен практическим работам. В каждой работе приведены краткие теоретические сведения, методики расчета, представлен порядок выполнения работ.

Предназначен для студентов, обучающихся по профилю 150400.62.04 «Литейное производство черных и цветных металлов» укрупненной группы 150000 «Металлургия».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.746(07)
ББК 34.612я73

ISBN 978-5-7638-2965-5

© Сибирский федеральный университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение качества отливок и получение их с заданными служебными и технологическими свойствами – фундаментальная научно-техническая проблема литейного производства, успешное решение которой обуславливает эффективность технологии литья как основной в производстве заготовок для различных отраслей машиностроения и приборостроения.

В настоящее время для обеспечения высокого качества отливки литейщику необходимы знания физических процессов, происходящих при заливке и заполнении форм расплавом; гидравлических процессов, которые зависят от свойств, сплава и формы; правильности расчетов всех полостей формы и скорости заполнения их расплавом. Физико-химические процессы, происходящие на границе металл–форма определяют все основные поверхностные дефекты в отливках. Умение управлять этими процессами, прогнозировать возможные виды взаимодействий позволяет литейщику разработать комплекс мер, обеспечивающих получение высококачественный литых изделий.

Задачами дисциплины являются формирование различных компетенций у студентов на основе следующих знаний, умений и навыков:

- умения использовать постоянно обновляющиеся информационные средства и технологии, а также анализировать сведения о развитии науки в области формирования отливки;
- владения навыками выбора материалов, оборудования и технологических операций для изготовления изделий различного назначения литьем;
- умения анализировать технологический процесс получения литых изделий, определяющий качество металлопродукции, энерго- и ресурсосбережение.
- умения анализировать и прогнозировать получение высококачественных отливок, основываясь на полученных знаниях по теории литейных процессов.

Целью лабораторного практикума является формирование следующих умений: выполнять необходимые экспериментальные исследования процессов, протекающих при приготовлении литейных сплавов и формировании отливок, и определять физико-механические и технологические (литейные) свойства сплавов.

Задачи сводятся к приобретению студентами следующих навыков: определение физико-механических и технологических (литейных) свойств металлов и сплавов и возможность на основе полученных данных давать дальнейшие рекомендации по способу изготовления отливок; квалифицированное применение основных средств контроля за качеством отливок; обоснование причины образования дефектов в отливках и рекомендация методов их предупреждения.

Полученные на лабораторных занятиях практические навыки позволят студенту обоснованно оценивать свойства сплавов и давать рекомендации для изготовления отливок исходя из условий их дальнейшей работы, а также учитывая химический состав и структурное состояние исходного сплава.

Целью практических работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины «Теоретические основы литейного производства», является освоение студентами наиболее простых и универсальных методов расчета параметров заполнения форм расплавом, размеров ковшей и элементов литниковых систем, тепловых процессов в литейной форме, параметров усадки при кристаллизации и охлаждении отливок.

1. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Цель работы

Изучение методики и определение краевого угла смачивания материалов литейных форм.

Задачи лабораторной работы

Освоить методики определения поверхностного натяжения жидкостей и краевого угла смачивания материалов.

Исследовать влияние типа материала литейных форм на изменение краевого угла смачивания глицерина методом «лежащей капли».

Краткие теоретические сведения

В различных технологических процессах плавки сплавов и получения отливок имеют место явления, происходящие на границах раздела жидких сплавов со шлаками, с газовой фазой и вакуумом, поверхностями песчаных и металлических форм и т.п. Поверхностные явления оказывают большое воздействие на качество выплавляемых сплавов, процессы кристаллизации и формирование кристаллической структуры, обуславливают химическую неоднородность отливок, влияют на заполняемость форм, особенно для тонкостенных отливок, качество поверхности отливок и другие стороны литейного процесса. В основе этого влияния лежит факт, что состояние атомов в поверхностных слоях жидких сплавов существенно отличается от состояния атомов в объеме жидкости.

При соприкосновении двух или нескольких фаз на границе раздела (например, при соприкосновении расплава с материалом формы) образуется скачок свободной энергии. В результате между фазами возникают силы взаимодействия, пропорциональные свободной энергии. Если энергия связи между частицами различных фаз преобладает над энергией связи между частицами в каждой фазе, то сближение сопровождается выделением энергии и увеличением термодинамической устойчивости всей системы. Такое взаимодействие между поверхностными слоями двух или более соприкасающихся разнородных фаз называют *адгезией*.

Величину адгезионного взаимодействия можно определить в процессе удаления жидкости с поверхности твердого тела. Адгезионное взаимодействие между жидкостью и твердым телом распространяется на небольшое расстояние в глубь жидкости. Это расстояние измеряется размерами молекул или несколько больше. По мере удаления слоя жидкости от поверхности твердого тела адгезионное взаимодействие уменьшается, уступая место *когезионному*, т.е. взаимодействию между молекулами в объеме жидкости.

Адгезия жидкости оценивается работой, которую надо затратить для отрыва жидкости от твердой поверхности, т.е. для восстановления исходного состояния контактирующих тел. Следовательно, работа адгезии будет в значительной степени определять чистоту поверхности отливки. Чем больше работа адгезии, тем сильнее сцепление расплава с формой.

Адгезионное взаимодействие зависит от величин, которые обуславливают свойства поверхностей (удельная свободная поверхностная энергия и поверхностное натяжение).

Отдельные атомы внутри жидкости связаны между собой взаимно уравновешенными силами, поэтому жидкость находится в покое (рис. 1.1). Равновесие атомарных сил, однако, нарушено на поверхности, где жидкость контактирует с другой средой, например, со стенкой формы, воздухом и т.п. Здесь атомы металлы имеют меньше соседей, чем внутри расплава. Вследствие этого силы притяжения на поверхности расплава не уравниваются, а возникают силы, направленные внутрь расплава перпендикулярно к его поверхности, называемые *поверхностным натяжением*. В результате на внутренние слои расплава, лежащие непосредственно под его поверхностью, действует давление, которое снижается пропорционально восьмой степени расстояния от поверхности.

Поверхностное натяжение σ соответствует силе F , которую необходимо приложить, чтобы увеличить периметр поверхности расплава на единицу длины l , или работе A , которую необходимо произвести для увеличения поверхности жидкости S на единицу площади по формулам

$$\sigma = dF / dl \quad \text{или} \quad \sigma = dA / dS.$$

Поверхностное натяжение измеряется в Н/м или Дж/м².

Значения поверхностного натяжения некоторых сплавов и металлов приведены в табл. 1.1.

Термодинамика рассматривает поверхностное натяжение как меру изменения свободной энергии системы при изменении ее поверхности:

$$dz = \sigma dS.$$

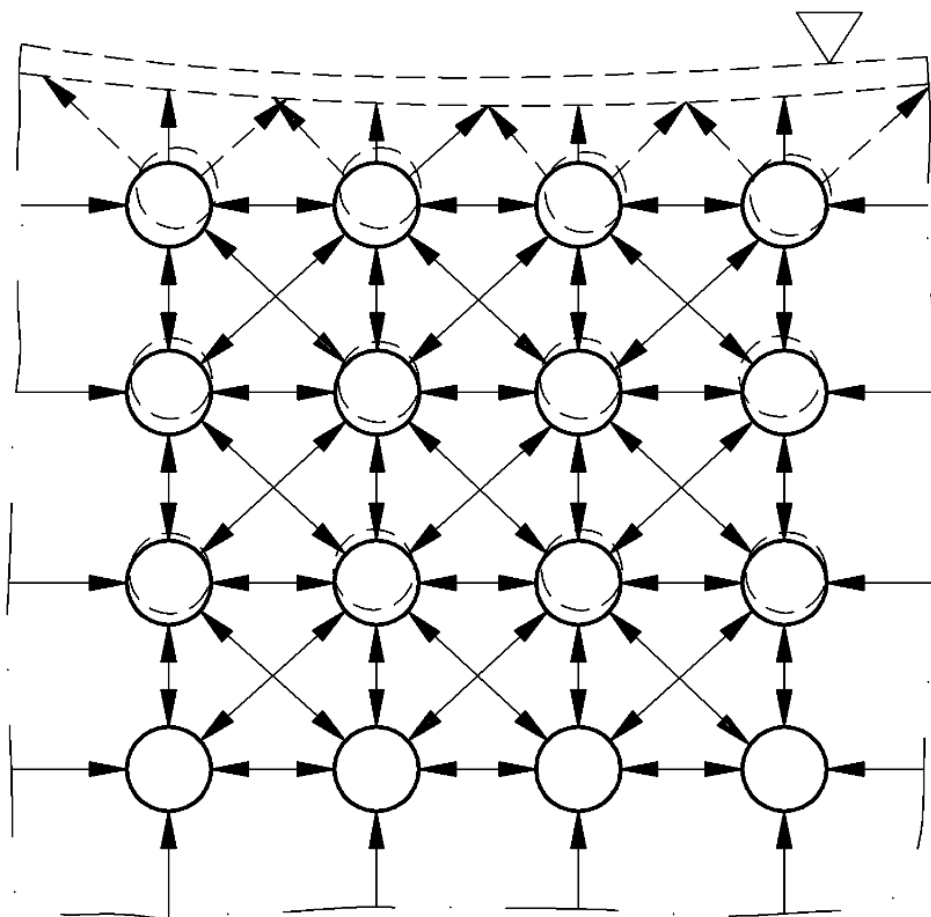


Рис. 1.1. Равновесие молекулярных сил
в расплаве

Таблица 1.1

Поверхностное натяжение некоторых металлов и сплавов

Металл	Температура, при которой произведено измерение, °C	Поверхностное натяже- ние, Н/м 10^{-3}
Олово	232	526
Алюминий	—	300
Медь	1 181	1 103
Сталь 0,3 % С	1 520	1 500
Серый чугун 3,9 % С	1 300	1 150
Ковкий чугун 3,1 % С	1 420	1 500
Вода	20	81 (для сравнения)

Как видим, самопроизвольными могут быть только те процессы, которые сопровождаются уменьшением поверхности раздела фаз, поскольку только в этом случае $dS < 0$ и $dz < 0$.

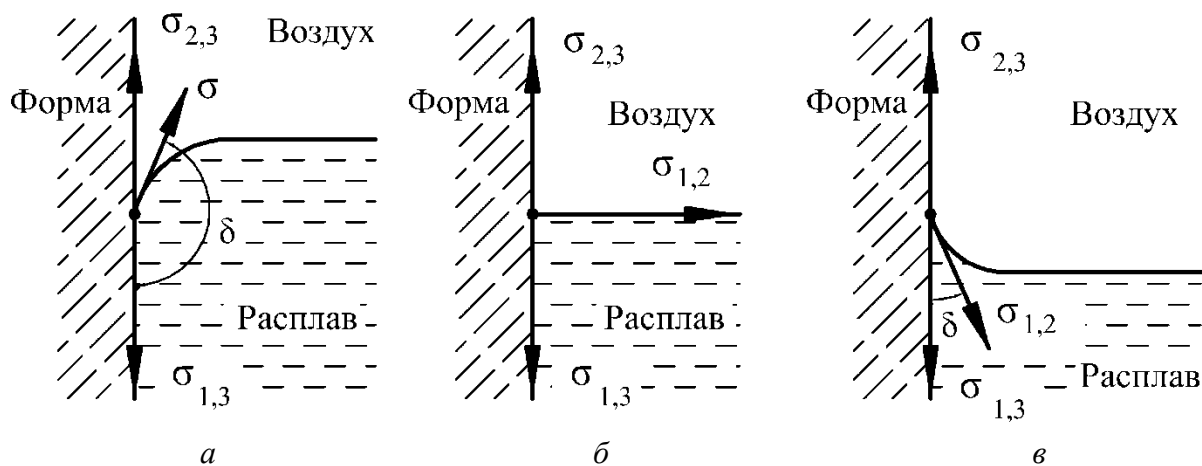


Рис. 1.2. Действие поверхностного натяжения на границе контакта двух сред:
 а – расплав не смачивает форму; б – расплав индифферентен к форме;
 в – расплав смачивает форму

Если силы, связывающие атомы, больше сил взаимодействия между ними и другой средой, например стенкой формы, то вследствие неуравновешенности сил поверхность жидкого металла приобретает выпуклую форму (рис. 1.2, а). Натяжение, возникающее на границе контакта между формой и расплавом, при этом уравнивается некоторым превышением уровня металла над местом контакта. Форма, таким образом, оказывает противодействие контакту металла с ней, т.е. она оказывается **металлофобной** – несмачиваемой.

Примем следующие обозначения: 1 – расплав, 2 – воздух, 3 – форма. Теоретически на границе раздела этих трех сред вследствие описанного эффекта действуют силы поверхностного натяжения. На границе между расплавом и воздухом поверхностное натяжение составит $\sigma_{1,2}$; между расплавом и формой – $\sigma_{1,3}$ и между воздухом и формой – $\sigma_{2,3}$. В данном случае $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$. В соответствии со схемой на рис. 1.2, а можно записать:

$$\sigma = dF / dl \quad \text{или} \quad \sigma = dA / dS.$$

Тогда

$$\cos \delta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}},$$

где $\cos \delta$ – краевой угол смачивания, который характеризует смачиваемость и определяется значением угла между поверхностью твердого тела и касательной к точке контакта с жидкостью и отсчитывается всегда в сторону жидкой фазы (рис. 1.3).

Несмачиваемость формы играет положительную роль, в частности препятствует проникновению расплава в поры поверхности формы и образованию механического пригара на отливках.

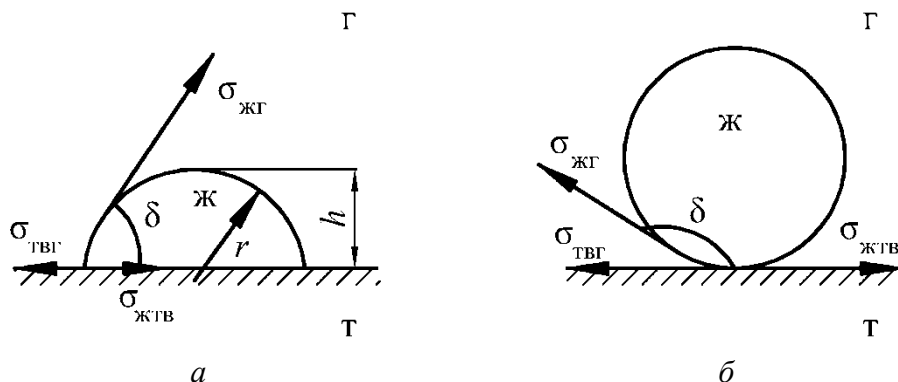


Рис. 1.3. Схема смачивания жидкостью поверхности твердого тела:
 а – капля жидкости на смачиваемой поверхности ($\delta < 90^\circ$); б – капля
 жидкости на несмачиваемой поверхности ($\delta > 90^\circ$); ж – расплав;
 т – форма; г – воздуха

Если поверхностное натяжение на границе между расплавом и формой и между воздухом одинаково, т.е. $\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3}$, (рис. 1.2, б), то форма индифферентна по отношению к металлу. В этом случае на границе контакта металла с формой не происходит ни подъема, ни опускания уровня расплава. В уравнении (1.1) пропадает второй член, так как $\delta = 90^\circ$, то $\cos \delta = 0$. Тогда

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3}.$$

Третий возможный вариант: $\sigma_{1,3} < \sigma_{2,3}$, как показано на рис. 1.2, в. Здесь справедливо равенство

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,2} \cos \delta,$$

$$\cos \delta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}.$$

В этом случае уровень металла на границе контакта с формой повышается, металл поднимается на стенку формы, т.е. она является смачиваемой (**металлофильной**). Смачивание формы способствует проникновению металла в поры ее поверхности, образованию пригара на отливках, а также более полному заполнению тонких сечений отливок и получению более точного отпечатка полости металлом.

Смачиваемость и несмачиваемость формы зависят от химического сродства металла и формы. Например, форма из смеси на основе кварцевого песка для сплавов железа является несмачиваемой. Однако из-за быстрого окисления поверхности расплава стали и чугуна на их поверхности образуется пленка из оксидов железа, которая является причиной повышения смачиваемости. Если в стали и чугуне содержится алюминий, то на их расплаве образуется пленка оксида алюминия, поверхностное натяжение повышается и форма плохо смачивается металлом.

Величина поверхностного натяжения и краевого угол смачивания определяют работу адгезии W_a жидкости к твердой поверхности по формулам

$$W_a = \sigma_{жг} + \sigma_{тг} - \sigma_{жт} \quad \text{или} \quad W_a = \sigma_{жг}(1 + \cos \theta),$$

где W_a – удельная работа адгезии жидкости к твердой поверхности, Дж/м².

Работа адгезии, характеризующая сцепление жидкости с твердой фазой, например металлического расплава со стенкой литейной формы, в значительной степени определяет чистоту поверхности отливки.

Высокое поверхностное натяжение значительно облегчает разливу металлов. Оно препятствует вспениванию, затрудняет нежелательное разделение струи металла и препятствует проникновению металла в стенку песчаной формы. В то же время поверхностное натяжение препятствует затеканию металла в острые углы и кромки и делает их закругленными. Поверхностное натяжение является показателем состояния расплава и изменяется в зависимости от состава, температуры и степени засоренности его неметаллическими включениями. Металлы с высокой температурой плавления обладают, как правило, более высоким поверхностным натяжением, чем легкоплавкие металлы. Поверхностное натяжение при литье достигает еще более высоких значений вследствие неизбежного окисления металлов.

Таким образом, адгезия и смачивание – это две стороны одного и того же явления, возникающего при контакте жидкости с твердым телом. Адгезия обуславливает взаимодействие между твердым телом и находящейся в контакте с ним жидкостью, а смачивание – это явление, которое имеет место на границе трех фаз, из которых одна является твердым телом, а две другие либо несмешивающимися между собой жидкостями, либо жидкостью и газом.

На практике определение значений адгезии затруднено тем, что истинная поверхность контакта составляет лишь малую часть полной поверхности соприкасающихся фаз.

При обычных условиях кристаллизация происходит при переохлаждении меньшем, чем необходимо для гомогенной кристаллизации. Кристаллизация при этом происходит прежде, чем возникнут устойчивые гомогенные зародыши, а кристаллы растут на примесях, включениях, стенках формы (гетерогенная кристаллизация). Если зародыш образуется на подложке, то возникает межфазное натяжение на границе: расплав–зародыш ($\sigma_{р.з}$), подложка–расплав ($\sigma_{п.р}$), подложка–зародыш ($\sigma_{п.з}$).

Результирующее энергетическое соотношение выразится уравнением

$$\sigma_{кр} = \sigma_{п.з} + \sigma_{р.з} \cdot \cos \theta.$$

Процесс сильно зависит от угла смачивания θ . С уменьшением угла смачивания облегчаются условия кристаллизации, т.е. чем больше струк-

турное сходство кристаллических решеток расплава и подложки, тем легче протекает процесс кристаллизации.

Все методы можно разделить на две группы: статистические и динамические. Для расплавов с более высокой температурой плавления более пригодными являются статические методы. При изучении смачивания поверхности формы расплавом металла наибольшее распространение получил метод «лежащей капли».

Описание лабораторной установки

Для проведения лабораторной работы необходимо использовать следующее оборудование: установка для измерения краевого угла смачивания методом «лежащей капли» и устройство для формирования капли.

Для определения краевого угла смачивания разработан ряд методов, например: метод принудительного формирования капли; расчет краевого угла по форме капли; метод погружения; по высоте подъема слоя жидкости, примыкающей к стенке сосуда; определение краевого угла в капиллярах и на нитях; «метод лежащей капли» и т.д.

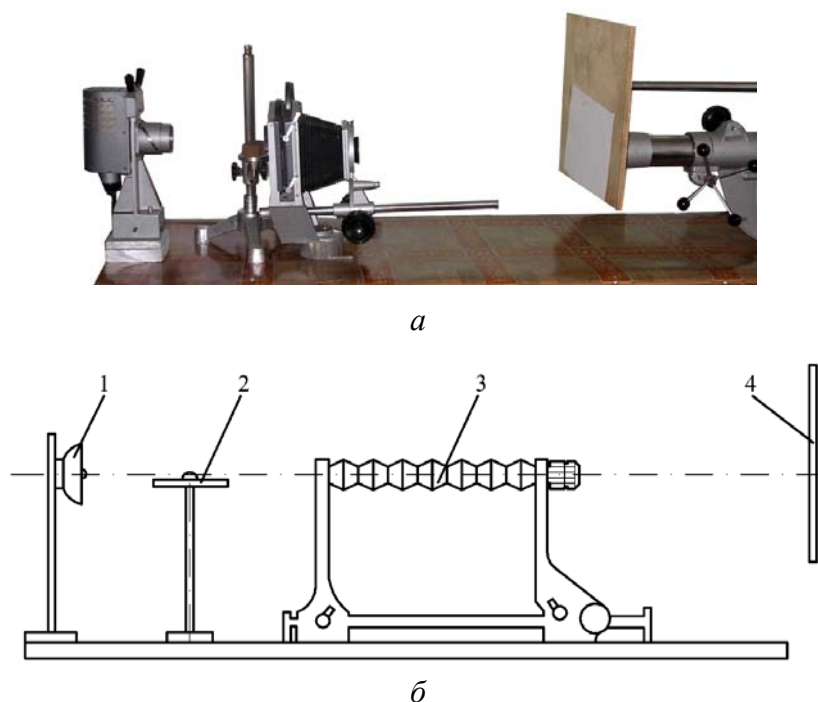


Рис. 1.4. Внешний вид (а) и схема (б) установки для определения краевого угла смачивания методом «лежащей капли»

Схема и общий вид установки для определения краевого угла смачивания методом лежащей капли показаны на рис. 1.4. Установка включает в себя источник света 1, увеличитель (набора линз) 3, испытуемую поверхность (образец) 2 и экран 4 (рис. 1.4).

Образцы для исследований изготавливают запрессовкой (рис. 1.5) под постоянным давлением исследуемых материалов в матрицу диаметром 30 мм и высотой 5 мм в жестком кольце. Каплю фотографируют, получившийся снимок переводят на компьютер, где с помощью специальной программы «AppSV» рассчитывают следующие показатели: краевой угол смачивания, работу когезии, коэффициент растекания и относительную работу когезии. Интерфейс программы показан на рис. 1.6.

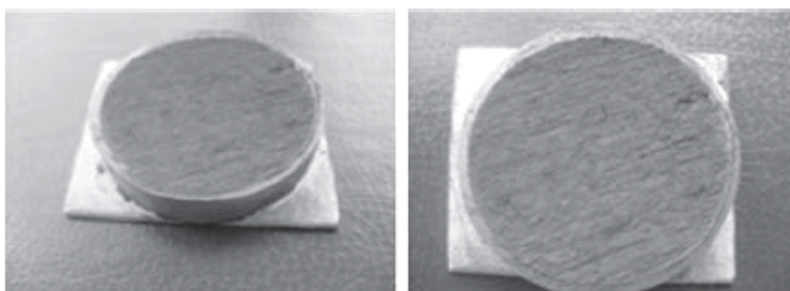


Рис. 1.5. Общий вид образца для испытаний

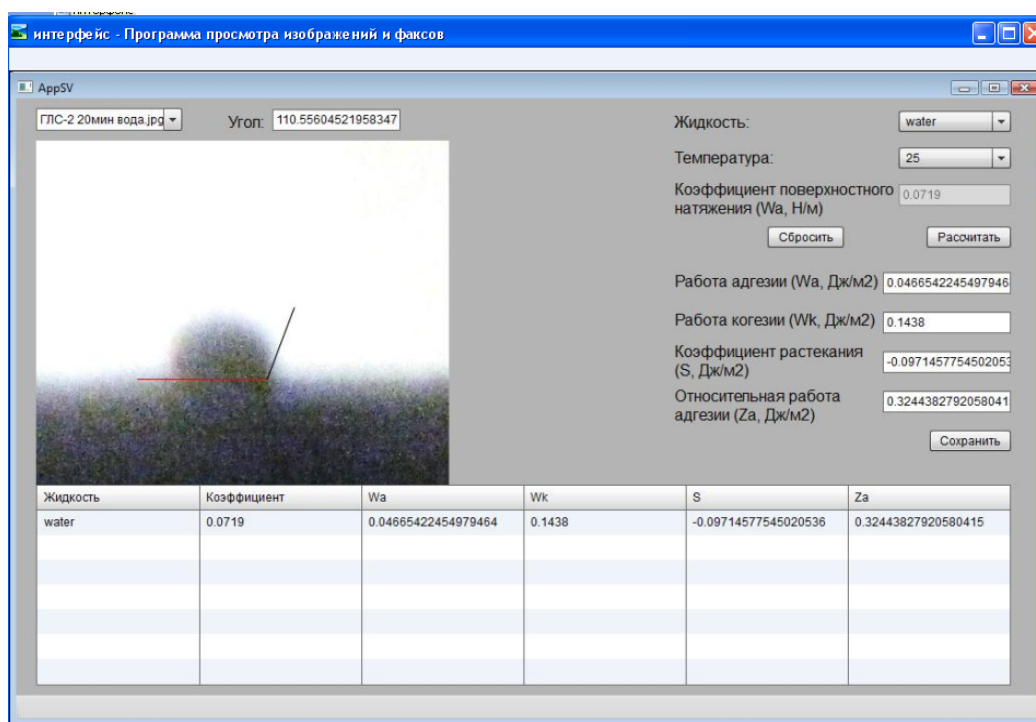


Рис. 1.6. Интерфейс программы «AppSV»

На снимке проекции капли проводят касательную к точке пересечения контура капли с подложкой и измеряют угол наклона этой касательной. Возможна ошибка измерения краевого угла, которая может составить 3–5°. Краевой угол очень малых капель измеряют, исходя из предположения, что капля сферична. Это несколько повышает точность измерения, хотя и в данном случае она составляет 1–2°. В связи с этим необходимо производить несколько измерений и брать средние данные.

Этот метод предусматривает непосредственное измерение угла по форме капли, находящейся на поверхности испытуемого образца. Каплю проектируют на экран, добиваясь максимальной резкости в изображении контура при помощи увеличителя. При измерении краевого угла необходимо зарисовать по проекции или сфотографировать форму капли. На снимке или рисунке проекции капли проводят касательную к точке пересечения контура капли с подложкой и измеряют угол наклона этой касательной.

Возможная ошибка измерения краевого угла может составлять 3–5 %. Краевой угол очень малых капель измеряют, исходя из предположения, что капля сферична. Это несколько повышает точность измерения, хотя и в данном случае она составляет 1–2 град.

Измерение таким методом краевых углов близких к 180 и 0 град, имеет достаточно большую инструментальную погрешность, связанную, в основном, с тем, что измерение проводят по одной проекции капли. Между тем в различных сечениях капли значения краевых углов могут колебаться. Эти колебания вызваны энергетической неоднородностью твердой поверхности, наличием загрязнений на ней и рядом других факторов. Кроме того, параметр смачивания может быть определен с некоторыми погрешностями, поэтому необходимо производить несколько измерений и брать средние значения.

Задание на выполнение лабораторной работы

Оценить влияние материала литейной формы на изменение краевого угла смачивания.

Формы изготавливать из следующих материалов:

- песчано-глинистой смеси (90 % – оборотной смеси; 6,5 % – кварцевого песка $1\text{K}_1\text{O}_1\text{O}_3$; 3,5 % – бентонитовой глины БМ2Т₂, воды),
- песчано-смоляной смеси (100 % песка кварцевого $1\text{K}_1\text{O}_1\text{O}_3$; 4,5 % – пульвербакелитовой смолы; 2,5–3,0 % – ацетона; 0,5 % – H_3BO_3),
- жидкостекольной смеси (95 % – кварцевого песка $1\text{K}_1\text{O}_1\text{O}_3$; 5 % – жидкого стекла).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить устройство установки для определения краевого угла смачивания методом «лежащей капли».
2. Получить у преподавателя образцы формовочной смеси, используемые в качестве подложки, и глицерин, используемый в качестве имитатора металла.
3. Провести определения значений краевого угла смачивания заданных формовочных смесей глицерином.

4. Рассчитать величину работы адгезии (поверхностное натяжение глицерина составляет 63,4 мН/м).

5. По полученным результатам построить график зависимости смачиваемости формовочных смесей глицерином. Сделать вывод о степени смачиваемости материалов.

Требования к отчету по лабораторной работе

В отчете указывается цель работы, дается краткое изложение теории, описание методики выполнения работы, таблица экспериментальных данных и результатов расчета (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Степень смачивания формовочных смесей глицерином

Формовочный материал	Краевой угол смачивания δ , град	Работа адгезии W_a , Дж/м ²

Защита лабораторной работы проводится по контрольным вопросам после оформления студентом отчета.

Контрольные вопросы

1. На какие процессы оказывают влияние поверхностные явления?
2. Что лежит в основе влияния поверхностных явлений на качество отливки?
3. Что образуется при соприкосновении фаз на границе раздела?
4. Что такое адгезия жидкости?
5. Как определяют величину адгезионного взаимодействия?
6. Как оценивают адгезию жидкости?
7. От чего зависит адгезионное взаимодействие?
8. Что такое когезия жидкости?
9. Что такое поверхностное натяжение?
10. Что показывает величина краевого угла смачивания?