

УДК 621.7-97

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРООТЛИВОК С АМОРФНОЙ СТРУКТУРОЙ

Юрий Олегович Фокин, Леонид Вячеславович Пастухов

*Студенты 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: А.Ю. Коротченко⁽¹⁾, С.Н. Поляков⁽²⁾,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»⁽¹⁾,
доктор технических наук⁽²⁾,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Открытие аморфных металлических сплавов (также называемых металлическими стеклами) внесло большой вклад в науку о металлах, существенно изменив наши представления о них. Оказалось, что металлические сплавы с аморфной микроструктурой разительно отличаются по своим свойствам от металлических кристаллов, для которых характерно упорядоченное расположение атомов. Очевидные преимущества аморфной структуры - отсутствие границ зерен дает совершенно новый уровень качества деталей: высокую прочность, пластичность, коррозионную стойкость.

Наиболее распространенным способом получения аморфной структуры для металлических сплавов является закалка из жидкого состояния (рис. 1). Кривая скорости охлаждения сплава (на рис. 1 показана упрощенно в виде прямой) должна проходить ниже кривой изотермического зарождения кристаллов (кривая начала кристаллизации на рис. 1). В этом случае кристаллы не возникают, а снижения подвижности атомов при более низких температурах стабилизирует первоначальную аморфную структуру жидкости.

Поскольку, получение отливки связано с переходом из жидкого состояния в твердое, то закалка из жидкого состояния является естественным способом получения аморфной структуры отливок. Получение крупных аморфных литых фасонных деталей проблематично из-за относительно невысоких скоростей охлаждения имеющих место в обычной литейной практике.



Рис.1. Кинетическая диаграмма получения аморфного металлического сплава путем закалки из жидкого состояния.

Однако современная техника имеет большую тенденцию к миниатюризации машин и приборов, где большую роль могут играть микролитые детали. Для отливок таких деталей создание высоких скоростей охлаждения не является уже неразрешимой задачей. В современных аморфных сплавах аморфитизация наступает уже при скоростях охлаждения $10^3 \dots 10^4$ К/с.

Для литых заготовок в форме лент и проволоки наиболее часто, на практике, используются два метода: в первом жидкий металл наносят на внешнюю цилиндрическую поверхность вращающегося диска (колеса), во втором расплав извлекается вращающимся диском. На рис. 2 представлены схемы устройств, реализующих указанные методы. Обод металлического диска или цилиндра изготавливается из материала, обладающего хорошей теплопроводностью (медь, бронза, латунь). Струя расплавленного металла вытекает под небольшим давлением (0,2 атм.) через инжекционное сопло, которое сделано из плавленого кварца или окиси алюминия. Струя попадает на поверхность быстро вращающегося колеса и затвердевает в виде непрерывной ленты шириной от 1 до 20 мм и толщиной 20...40 мкм.

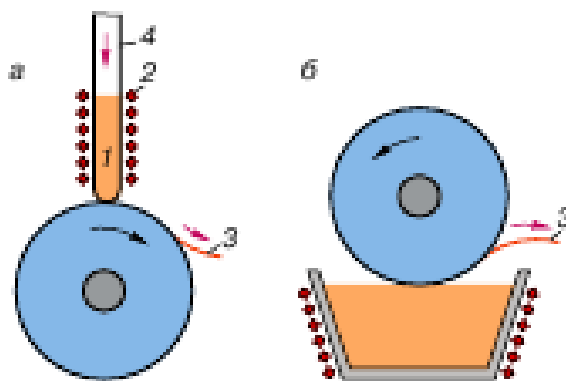


Рис. 2. Схема устройств:

а – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр;

б – извлечение расплава вращающимся диском

Во втором методе заостренный обод диска захватывает расплав, который затем затвердевает и самопроизвольно отделяется в виде коротких проволочек. Частота вращения диска или цилиндра должна быть такой, чтобы обеспечить линейную скорость обода не менее 50 м/с.

Известно, что при контакте двух тел с разной температурой в начальный момент возникают очень высокие градиенты температур, которые соответствуют высоким скоростям нагрева и охлаждения соответственно. Если одно тело намного массивнее другого и используется как холодильник, то кратковременно существуют условия для создания очень высокой скорости охлаждения. Высокая скорость охлаждения заготовок в описанных методах достигается путем кратковременного контакта с холодильником, частью поверхности массивного диска или цилиндра, нагрев которого быстро снимается в последующей более длительной фазе охлаждения. Метод легко реализовать конструктивно для тонких лент и проволоки и, может быть для некоторых профильных конфигураций, но получить заготовки, такие как фасонные отливки, технологически невозможно.

При охлаждении отливки в форме высокая начальная скорость охлаждения быстро уменьшается за счет повышения пристеночной температуры формы вследствие низкой теплопроводности обычных формовочных материалов. Таким образом,

основная проблема достижения высоких скоростей охлаждения в форме связана с устранением, или уменьшением ее разогрева. Естественные пути решения проблемы – повышение теплопроводности и увеличения тепловой аккумуляции формы. Этот путь имеет существенные ограничения по свойствам современных материалов. Однако, если конструктивно разделить формообразование отливки и ее охлаждение, то при таких вариантах организация высоких скоростей становится возможной.

Одним из вариантов представляется охлаждение отливки вместе с формой в криогенной жидкости. В этом случае форма должна обладать достаточной прочностью и жесткостью, чтобы оформлять геометрию отливки, но одновременно иметь высокую теплопроводность, т.е. высокую теплопроводность и малую толщину стенки. Например, можно использовать технологию изготовления графитовых форм. В этом случае тепловой поток будет определяться отношением значений теплопроводности формы и ее толщины $\lambda_{\phi}/\Delta_{\phi}$, а также коэффициентом теплоотдачи α с поверхности формы в кипящую криогенную жидкость. Известно, что при определенных условиях вынужденной конвекции эти коэффициенты могут принимать высокие значения.

Вторым технологическим способом может быть организация контактного теплообмена через поверхность формы с массивным твердым холодильником. Конечно, требования к прочности и жесткости формы здесь будут выше, чем в первом варианте.

В соответствии с этими двумя способами организации охлаждения могут быть сконструированы установки для получения микроотливок с аморфной структурой. Для разработки конструкции этих установок необходимо знать необходимые параметры управляющие теплообменом между отливкой и формой, а также их взаимосвязь с конструктивными параметрами установки и технологическими параметрами отливки. В настоящей работе проводится анализ условий охлаждения микроотливок в двух вариантах: охлаждение микроформы в криогенной жидкости и кондуктивное охлаждение в массивной медной форме.

Для упрощения расчетов примем, что отливка представляет собой тонкую пластину толщиной 1 мм. Толщина стенки формы равна 1 мм (рис. 3).

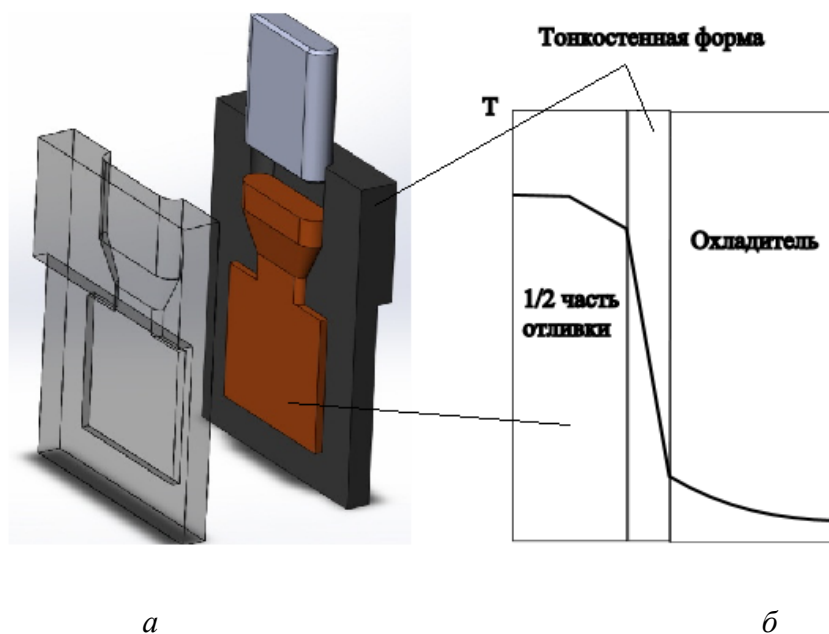


Рис. 3. Эскиз отливки в форме (а) и схема к анализу теплообмена (б)

Оценка режимов криогенного охлаждения микроотливки в тонкостенной форме

Охлаждение формы с отливкой происходит в криогенной жидкости (предположительно жидком азоте). При этом температура стенки формы T_c , контактирующая с охлаждающей средой намного выше температуры кипения ($T_k = 77.4$ К при атмосферном давлении).

Различают два основных режима кипения жидкостей: пузырьковый и пленочный, которые определяют и два режима охлаждения поверхности. Пузырьковый режим является началом всякого процесса кипения. Пленочный режим кипения связывают с кризисом в развитии пузырькового кипения. Т.е. увеличения парообразования ведет к объединению отдельных пузырьков в сплошную газовую подушку, отделяющую охлаждающую поверхность от охлаждающей жидкости. Интенсивность теплообмена при этом резко снижается. Этот процесс нестабилен и состоит в периодическом прорыве газовой подушки и повторном развитии пузырькового кипения – второе кризисное явление. Иногда говорят о «гистерезисе» теплообмена при кипении.

Теплообмен между стенкой формы и охлаждающей средой вследствие турбулизации в граничном слое носит комбинированный характер и состоит из охлаждения пристеночных слоев жидкости за счет интенсивного парообразования с теплотой испарения 5.57 Дж/моль и принудительного конвективного охлаждения двухфазным потоком стенки формы. Интенсивность последнего зависит от скорости потока, или от числа Рейнольдса. При высоких скоростях жидкости в пограничном слое может происходить подавление парообразования за счет срыва пузырьков пара еще не достигших критического диаметра, достаточного для отрыва от стенки. Такие пузырьки уносятся потоком от стенки формы и захлопываются с выделением энергии. Теплообмен в этом случае будет проходить преимущественно по модели принудительной конвекции.

Интенсивность теплообмена при конвективном теплообмене в жидкости характеризуется безразмерным коэффициентом теплоотдачи Нуссельта $Nu = \alpha \delta_T / \lambda$, где α – коэффициент теплоотдачи Ньютона, δ_T – толщина теплового пограничного слоя жидкости, где температура изменяется от температуры стенки до температуры жидкости в удаленных слоях, λ – коэффициент теплопроводности жидкости. Физический смысл этого числа заключается в соотношении интенсивности теплоотдачи на охлаждаемой/нагреваемой поверхности от конвекции α и от теплопроводности λ / δ_T .

Можно предположить, что высокая теплотдача с поверхности формы будет связана со срывом пленочного кипения и турбулизацией пристеночной области, что должно описываться моделью турбулентного пограничного слоя. Для вычисления числа Нуссельта при обтекании пластины потоком жидкости в турбулентном пограничном слое ($Re > 4 \cdot 10^4$) рекомендуют использовать соотношение:

$$\overline{Nu} = 0.664 \overline{Re}^{0.50} Pr^{0.33} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от того, нагревается ли жидкость или охлаждается. Градиент температуры в пограничном слое при нагревании больше, чем при их охлаждении. Зависимость α от направления теплового потока учитывается

множителем $\left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$, где Pr_w – число Прандтля жидкости, взятое при температуре

стенки. При нагревании жидкости величина $\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.25}$ несколько больше единицы. Для оценочных расчетов примем ее значение равным 1. Таким образом, получаемые оценочные значения коэффициента теплоотдачи будут несколько меньше, т.е. дается нижняя оценка коэффициента теплоотдачи.

Для капельных жидкостей можно использовать поправку Рейнольдса с поправкой на число Прандтля, при этом соответствующие значения чисел Нуссельта, будут равны:

$$Nu_x = \frac{c_f}{2} Re_x^n Pr^{0.4}$$

$$Nu_x = 0.037 Pr^{0.4} Re_x^{0.8}$$

Следовательно, для нашей задачи для расчета конвективного теплообмена следует пользоваться формулой

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

Значение коэффициента Прандтля для жидкого азота при $T = -190^\circ\text{C}$ равно 20.

Для оценки эффективного значения коэффициента теплоотдачи, учитывающего одновременный эффект от кипения и конвективного теплообмена существует много приближений. Для кипения при вынужденной конвекции интенсивность теплоотдачи зависит от соотношения коэффициента турбулентного переноса, вызываемого кипением и движением жидкости. При больших скоростях движения жидкости определяется законами турбулентного движения $\alpha \sim w^{0.8}$. В зависимости от соотношения коэффициента теплоотдачи при чистом кипении α_1 и коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении без кипения α_0 в общем случае принимают равным:

$$\alpha_{эфф} = \alpha_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_0}\right)^2}$$

где α_0 - значение коэффициента теплоотдачи, рассчитываемого без учета кипения жидкости α_1 - коэффициент теплоотдачи $(\text{Вт}/\text{м}^2\text{K})$ при развитом пузырьковом кипении. Для пузырькового кипения жидкого азота в состоянии насыщения при свободной конвекции полагают $\alpha_1 = 4.7 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}$. Получим оценочное значение коэффициента α_0 в условиях вынужденной конвекции потока вдоль охлаждаемой поверхности формы с использованием формулы (1). При $Pr = 20$, и Рейнольдс на границе перехода от ламинарного режима в граничном слое к турбулентному $Re = (3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6)$ - это число конечно зависит от состояния поверхности формы и развития режима кипения, и может быть значительно меньше. Рассмотрим условия теплообмена при максимальном значении Рейнольдса, имея в виду, что реальное значение может быть существенно меньше, получим число Нуссельта:

$$Nu = 0.037 \cdot (3 \cdot 10^6)^{0.8} 20^{0.4} \approx 18634$$

Толщину пограничного теплового слоя приближенно можно оценить по критериальному соотношению:

$$\delta_T \approx \frac{L}{\sqrt{Re Pr}} = \frac{0.02}{\sqrt{3 \cdot 10^5 \cdot 20}} = 0.81 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

У Гухмана дается приближенная оценка толщины динамического пограничного слоя δ_D исходя из равенства сил инерции и сил трения. Это ведет к приближенной формуле для оценки гидродинамического пограничного слоя ($\delta_D \approx L/\sqrt{Re}$), где за характерный размер L можно взять средний поперечный размер поверхности формы, контактирующей с охлаждающей жидкостью (далее примем этот размер равным 0.02м, т.е. 2 см).

Т.к. $Pr = 20$, то тепловой слой полностью содержится в динамическом слое. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции без учета кипения будет $\alpha_0 = Nu \cdot \lambda / \delta_T = 18634 \cdot 0.14 / 0.26 \cdot 10^{-4} = 10^8 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Это означает, что вынужденная конвекция в данных условиях вносит в теплообмен преобладающий эффект:

$$\alpha_{эфф} = 10^8 \sqrt{1 + (4.7 \cdot 10^4 / 10^8)^2} \approx 10^8 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Максимальная скорость истечения жидкого азота из сопла получается из значения Рейнольдса для турбулентного режима $Re = 3 \cdot 10^6$, вязкости расплава и характерного размера формы $L = 0.2 \text{ м}$, обтекаемой потоком жидкости:

$$V = Re \cdot \nu / L = 3 \cdot 10^5 \cdot 1.74 \cdot 10^{-6} / 0.02 = 26.1 \text{ м/с}$$

Полученные оценки коэффициентов теплообмена и скорости принудительно движения жидкости достаточны для проектирования экспериментальной установки, где эти параметры должны изменяться в определенном диапазоне, с конечной целью получения необходимых и, может быть в некотором смысле оптимальных скоростей охлаждения для создания аморфной структуры микроотливок. Заметим, что используемое для оценки критическое значения Рейнольдса ($3 \cdot 10^5$) достаточно высоко и реальное будет, скорее всего, меньше. Но, это только усиливает выдвинутые положения о преобладающем влиянии вынужденного конвективного теплообмена.

Оценка режимов контактного охлаждения микроотливки в тонкостенной форме в массивный твердый холодильник

Для анализа контактного теплообмена необходимо прежде всего иметь отчетливые представления о профиле поверхности и знать параметры шероховатости и волнистости, решить контактную задачу типа Герца с учетом шероховатости, определить площадь фактического контакта, средний размер пятен пятна микроконтакта и осредненную конфигурацию зазора. Каждая из этих задач является сложной.

С достаточной для практических расчетов точностью профиль шероховатой поверхности может быть описан стационарной случайной функцией, имеющей нормальное распределение.

Две твердые поверхности приходят в соприкосновение по вершинам отдельных выступов. Образующаяся таким образом площадь фактического контакта состоит из отдельных площадок, расположенных на разных высотах и под разными углами. Так как угол наклона элементов профиля к геометрической поверхности невелик (даже при грубой обработке он не превышает 20° , а при шлифовании не превышает 10°), то отличие величины пятен фактического контакта от их проекций на плоскость, параллельную рассматриваемым поверхностям, незначительно. При соприкосновении двух шероховатых поверхностей форма пятен приближается к кругу.

Средний размер пятен при увеличении нагрузки изменяется незначительно, а рост площади фактического соприкосновения происходит в основном за счет увеличения числа пятен. Более того, эксперименты показывают, что размеры пятен контакта для различных материалов близки.

Последнее обстоятельство особенно ценно для рассмотрения тепловых явлений, так как дает возможность теоретически подойти к оценке термического сопротивления любого контакта.

Микровыступы шероховатости весьма стойки против внешних нагрузок. При контактных давлениях, не превышающих $(100...200)10^5$ Па, относительное сближение соприкасающихся поверхностей (или, что то же, относительная деформация выступов шероховатости) невелика особенно при повторных нагружениях. Поэтому величина зазора между соприкасающимися поверхностями при их сжатии в указанных пределах изменяется незначительно.

По мере увеличения силы сжатия две соприкасающиеся поверхности сближаются за счет деформации микронеровностей, обеспечивая вступление в контакт все большего количества точек и рост фактической площади соприкосновения.

Для задачи контактного теплообмена большой интерес представляет вопрос формирования реальной площади касания и сближение при различных видах деформации микронеровностей (рис. 4).

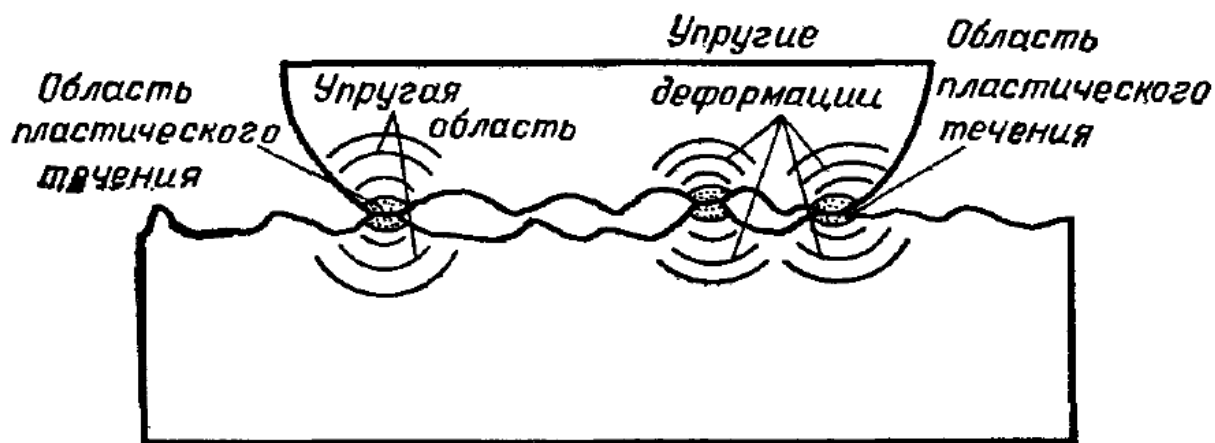


Рис. 4. Деформация микровыступов

При охлаждении методом контактного теплообмена литейная форма будет подвергаться серьезным механическим воздействием, также она должна обладать высокой теплопроводностью, поэтому форму целесообразно изготавливать из меди. Таким образом мы будем рассматривать контакт двух медных поверхностей.

Выражение для расчета величины сближения и относительной площади фактического контакта:

$$\eta = \frac{N}{S_H \cdot C \cdot \sigma_T} + 2.7 \frac{b^{\frac{1}{\nu}} \cdot \nu \cdot \rho \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^2 \cdot (C \cdot \sigma_T)^{\frac{1+\nu}{\nu}} \cdot \left(\frac{N}{S_H} \right)^{\frac{\nu-1}{\nu}}}{h_{\max}}$$

где $C=3$, $\mu=0,37$ (коэффициент Пуассона), $\sigma_T=258$ МПа, $E=123000$ МПа.

Первое слагаемое характеризует площадь, соответствующую пластической деформации, второе – выражает площадь упруго деформированных выступов. Как показывают расчеты и экспериментальные исследования, для классов чистоты обработки не выше 10го величина ϵ_k весьма мала. Поэтому для определения площади фактического контакта можно с некоторым приближением ограничиться первым слагаемым.

$$\eta = \frac{N}{3 \cdot S_H \cdot \sigma_T} = \frac{N}{3 \cdot 250 \cdot 258} = \frac{N}{193500}$$

$$\eta(N) = \frac{1}{193500} \cdot N$$

где N зависит от характеристик привода. Допустим, что нагрузка приложенная к стенке формы равна 50000 Н, тогда

$$\eta(50000) = \frac{1}{193500} \cdot 50000 = 0.25$$

Общая тепловая проводимость контакта складывается из термической проводимости мест фактического контакта и термической проводимости газового зазора.

Формула для первоначального нагружения:

$$\alpha_K = \alpha_C + \alpha_M = \frac{\lambda_C \cdot Y}{h_{01} + h_{02}} + 1.6 \cdot 10^4 \cdot \frac{\overline{\lambda_M}}{\psi_t \cdot \psi_k} \cdot \frac{p}{3 \cdot \sigma_B}$$

$$\psi_k = 1 + 0.5k, \text{ где } k=0.05 \dots 0.15$$

$$\psi_k = 1 + 0.5 \cdot 0.1 = 1.05$$

В качестве σ_B берется предел прочности материала.

$$\psi_t = 1 - 1.41 \cdot \eta^{\frac{1}{2}} + 0.3 \cdot \eta^{\frac{3}{2}}, \text{ где } \eta = 0.25$$

$$\psi_t = 0.33$$

$$\alpha_K = \alpha_C + \alpha_M = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 2}{1.6 \cdot 10^{-6}} + 1.6 \cdot 10^4 \cdot \frac{400}{1.05 \cdot 0.33} \cdot \frac{200}{3 \cdot 394} = 37500 + 3125282 \approx 3.16 \cdot 10^6 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Приведенные расчеты по критериям подобия носят оценочный характер, и следует ожидать точности в пределах порядка искомых величин. Более точные расчеты могут быть проведены после проведения экспериментов на проектируемой установке.

Далее необходимо провести сравнение значений коэффициентов теплообмена в двух способах и их технологические "за" и "против", и к каким скоростям охлаждения эти коэффициенты приводят.

Литература

1. *А.В. Лыков*. Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. -480с.
2. *С.С. Кутателадзе*. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. -416с.
3. *А.А. Гухман*. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М. Высшая шк., 1974. -327с.
4. *А.Н. Павленко, И.П. Стародубцева*. Переходные процессы при кипении. УДК 536.248. Институт теплофизики СО РАН, С. 32-41.
5. *Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.* Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. - 328 с.
6. *И.В. Золотухин*. Аморфные металлические материалы. / И.В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. - №4. - 1997. – С. 73-78.