

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОН КОНТАКТА В СРЕДЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ АЭС

© 2011 А.В. Безнососов<sup>1</sup>, Т.А. Бокова<sup>1</sup>, Ю.Н. Дроздов<sup>2</sup>, К.А. Махов<sup>1</sup>, О.О. Новожилова<sup>1</sup>, М.В. Ярмонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е.Алексеева, г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 10.11.2011

В статье приводятся результаты аналитических и экспериментальных работ по исследованию триботехнических характеристик контактных пар в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, контактный слой, конструкционный материал, замораживание, материаловедческий анализ, профилограф

Принятое правительством Российской Федерации решение о развитии направления инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинец-висмутовым (СВБР) и свинцовым (БРЕСТ) теплоносителями инициируют исследования в области триботехники зон контакта в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ). Эти исследования необходимы для соответствующего обоснования проектных и эксплуатационных решений оборудования реакторных контуров.

Вследствие сложности и многообразия процессов трения, изнашивания и смазочного действия в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей в зоне контакта основным методом исследования триботехнических характеристик являются проведение экспериментов в условиях, максимально приближенных к условиям реакторных контуров.

Особенностью триботехники в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей реакторных контуров являются [1]: - высокие температуры (до 550-600<sup>0</sup>С), исключающие применение традиционных смазочных материалов; - несмачиваемость стальных поверхностей со сформированными на них защитными оксидными покрытиями; - незначительная вязкость жидкометаллических теплоносителей, не позволяющая рассматривать их как смазочную среду; - теплофизические характеристики этих теплоносителей, позволяющие интенсивно отводить тепло от контактных зон и областей; - малая растворимость основных примесей, прежде всего соединений кислорода и компонентов конструкционных материалов в этих теплоносителях; - объединение

(агрегатирование) частиц примесей в объеме теплоносителя, их концентрирование в пристенных областях и на свободных поверхностях. Концентрирование дисперсных частиц в пристенных областях может изменить физические свойства жидкометаллического теплоносителя в пристенной области, придавая им свойства неньютоновских жидкостей, изменяя смазочные характеристики зон контакта и др.

### Методика экспериментов

Исследования триботехнических характеристик зон контакта в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей в НГТУ проводилось, наряду с другими методами, методом экспресс-замораживания. Сущность этого метода заключается в быстром (порядка за 1 секунду) замораживании установившегося в течении десятка часов потока жидкого металла в трубопроводе экспериментального участка с температурой 400-500<sup>0</sup>С. После замораживания участок застывшего теплоносителя вместе с ограничивающей поток стальной стенкой вырезался из стенда для исследования зоны контакта теплоносителя и стенки. Состояние зоны контакта при этом сохранялось в состоянии, близким к состоянию в потоке теплоносителя, в отличие от условий, характерных при традиционных исследованиях.

Серия исследований триботехнических характеристик в среде свинцового теплоносителя проводилась на циркуляционном стенде (рис.1.) при температуре 450<sup>0</sup>С; содержании термодинамически активного кислорода в свинце на линии насыщения; средней скорости потока свинца в трубе 14x2 из стали 08X18H10T – 0,5, 1,0 м/с, скорости изменения температуры от 450<sup>0</sup>С – 120<sup>0</sup>С град/сек, время прокачки свинца через экспериментальный участок – 100 часов.

Контроль температуры на экспериментальном участке (рис. 2.) проводился с использованием микротермопар, подключенных к автоматизированной системе сбора и обработки экспериментальных данных.

Анализы зон контакта образцов и сравнение их результатов проводилось для образцов стальной трубки и извлеченного из нее слитка свинца после

Безнососов Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, E-mail: beznosov@ntnu.nnov.ru

Дроздов Юрий Николаевич, доктор технических наук, руководитель отдела, E-mail: drozdov@imash.ac.ru

Бокова Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, E-mail: ats@ntnu.nnov.ru

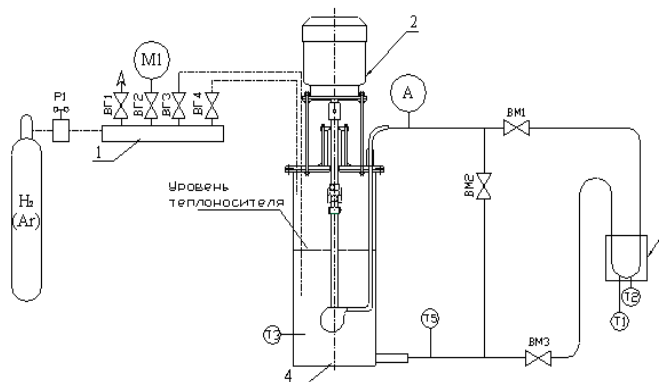
Новожилова Ольга Олеговна, кандидат технических наук, ассистент, E-mail: ats@ntnu.nnov.ru

Ярмонов Михаил Владимирович, аспирант

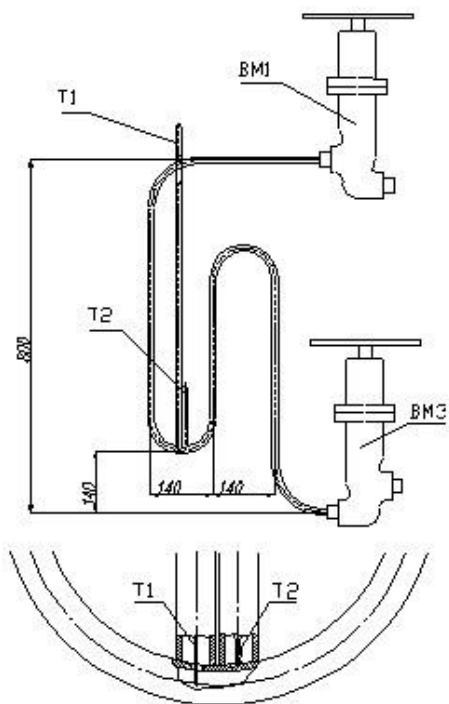
E-mail: ats@ntnu.nnov.ru

Махов Кирилл Андреевич, аспирант, E-mail: ats@ntnu.nnov.ru

циркуляции свинца (10 часов) и экспресс-замораживания экспериментального участка, а также контрольного образца (в состоянии поставки), образца после выдержки в среде атмосферного воздуха в течение 100 часов при температуре 550<sup>0</sup>С и образца из участка этого же стенда после дренирования из него свинца традиционным способом (рис. 3).



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда 2009–ПО:  
1. Газовый коллектор экспериментального стенда;  
2. Жидкометаллический насос; 3. Экспериментальный участок (участок замораживания);  
4. Емкость с ТЖМТ.



**Рис. 2.** Схема заделки термопар в экспериментальном участке.

**Обсуждение результатов**

На фото шлифов поперечного сечения пристенной области (рис.4, 5) «замороженного» потока свинца в пристенном слое последнего фиксируются образования примесей. Толщина слоя этих

примесей, пропитанных свинцом составила от 80 до 400 мкм.

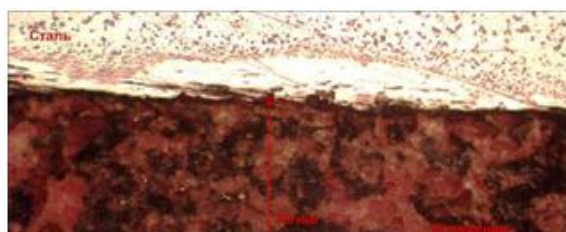
При дальнейшем отдалении от стенки трубы вглубь «замороженного» потока свинца частицы и образования примесей в свинце практически не фиксируются.



**Рис. 3.** Фото образцов, полученных для материаловедческого анализа: а) образец №1 «контрольный» образец, не участвовавший в эксперименте (исходное состояние); б) образец №2 образец после выдержки в среде атмосферного воздуха при Т=5500С в течение 100 часов; в) образец №3 образец, выдержанный в среде циркулирующего расплава свинца при Т=5500С в течение 100 часов; г) ответная к образцу № 3 поверхность застывшего свинца; д) образец №5 образец циркуляционного контура стенда после дренирования теплоносителя.

Таблица. Шероховатость образцов

№ образца	Ra, мкм	Rz, мкм	$(R_a^I - R_a^I) / R_a^I \cdot 100\%$	$(R_z^I - R_z^I) / R_z^I \cdot 100\%$
Образец №1	0,876	4,949	-	-
Образец №2	0,931	4,931	5,6%	0,4%
Образец №3	2,764	12,618	213%	155%
Образец №4	2,754	13,448	213%	271%
Образец №5	4,7166	20,491	436%	323%



**Рис. 4.** Фото шлифа поперечного сечения пристенной области «сталь – ТЖМТ» в трубе под микроскопом при 200 кратном увеличении.

Отмечена переменная толщина пристенной области от 394 мкм до 86 мкм, а также наличие частиц примесей в потоке ТЖМТ вблизи пристенной области. При отдалении от пристенной области частицы примесей в застывшем теплоносителе не наблюдаются.

Микротвердость металлов в поперечном сечении образцов изменяется от характеристик стали 08Х18Н10Т (рис. 6) в приповерхностной области (2300-2800 МПа) до характеристик образований примесей, пропитанных свинцом (500-1300 МПа) в слое, толщиной от 100 до ок 600 мкм, а затем до характеристик «чистого» свинца.

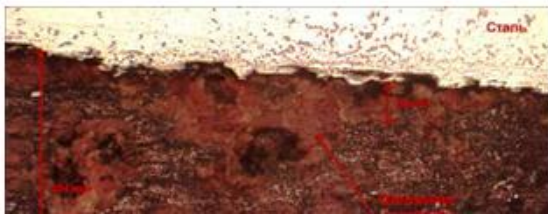


Рис. 5. Фото шлифа поперечного сечения пристенной области «сталь – ТЖМТ» под микроскопом при 200 кратном увеличении.

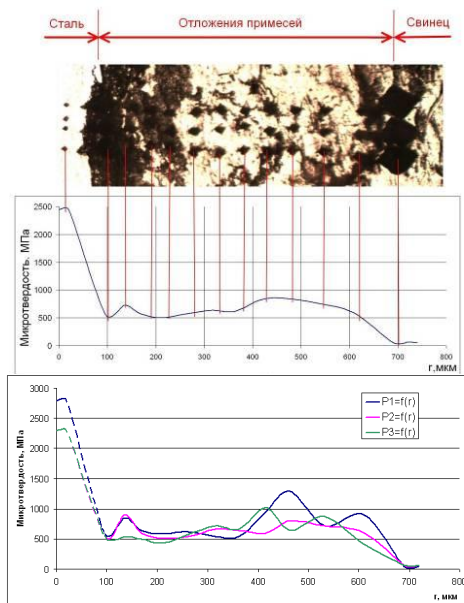


Рис. 6. Результаты измерения микротвердости пристенной области.

На графиках пунктиром отмечена область, в которой измерить микротвердость примененным методом невозможно, так как невозможно визуально определить размер отпечатка из-за сильного затемнения образца в области оксидного покрытия.

Пристенный слой имеет микротвердость самого теплоносителя. Фиксировались образцы (рис.7) на которых образования примесей были отделены от пристенного слоя слоем «чистого» свинца.

В образце из экспериментального участка экспресс-замораживания, слиток «замороженного»

свинца легко, без усилий отделялся от стальной стенки. После их разделения на внутренней поверхности стенки (рис.8) и на внешней поверхности отделенного слитка свинца (рис.9) фиксируются отложения примесей, пропитанных свинцом переменной толщины.

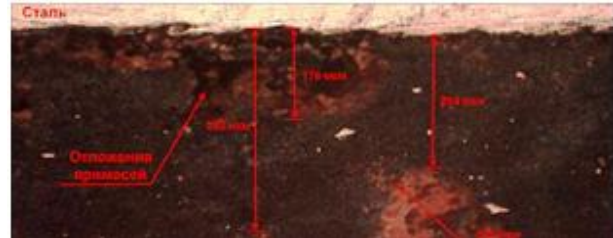


Рис. 7. Фото внутреннего края шлифа торцевой поверхности (увеличение 200 раз).

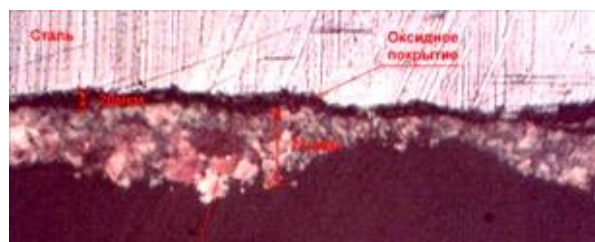


Рис. 8. Фото участка шлифа пристенной области после отделения застывшего теплоносителя от конструкционного материала при 200 кратном увеличении. Образец залит эпоксидной смолой, применен светофильтр для увеличения контраста структур (иначе частицы примесей трудноразличимы).

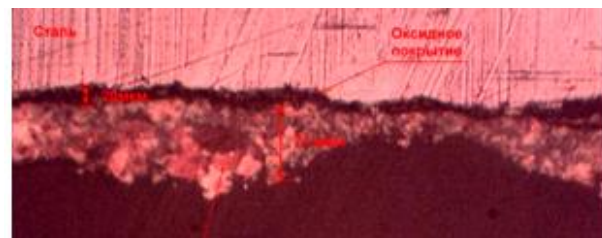


Рис. 9. Фото участка пристенной области после отделения застывшего теплоносителя от конструкционного материала при 200 кратном увеличении. Образец залит эпоксидной смолой, применен светофильтр для увеличения контраста структур.

Профилограмма внутренней поверхности участка образца стальной трубки (рис. 10), из которой был извлечен слиток свинца и профилограмма наружной поверхности последнего (рис.11.) совпадают или достаточно близки. Размер частиц фиксируемых в пристенном слое свинца (рис.12.) составляет от 1 до 50 мкм. Образования частиц примесей имеют неправильную форму.

В пристенном слое фиксируются газовые пузырьки и газовые полости (рис. 13), возможно, обра-



зовавшиеся из этих пузырьков при экспресс-замораживании потока свинца.

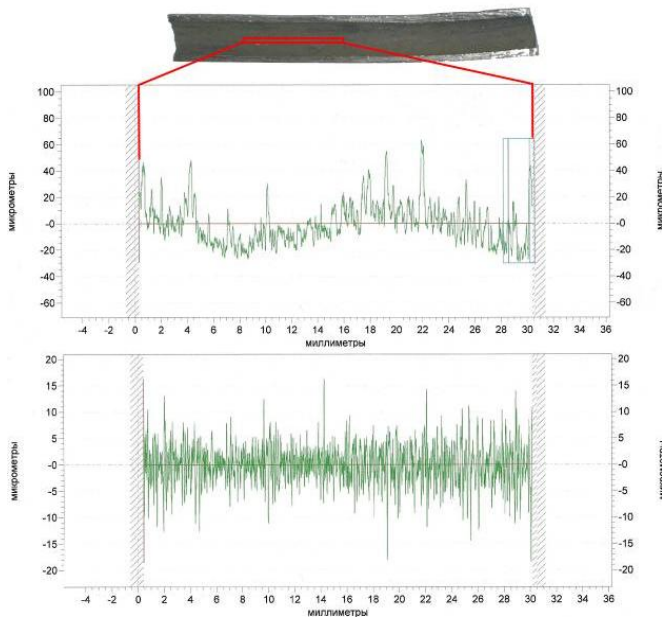


Рис. 10. Профилограмма (профиль (а) и шероховатость (б)) внутренней

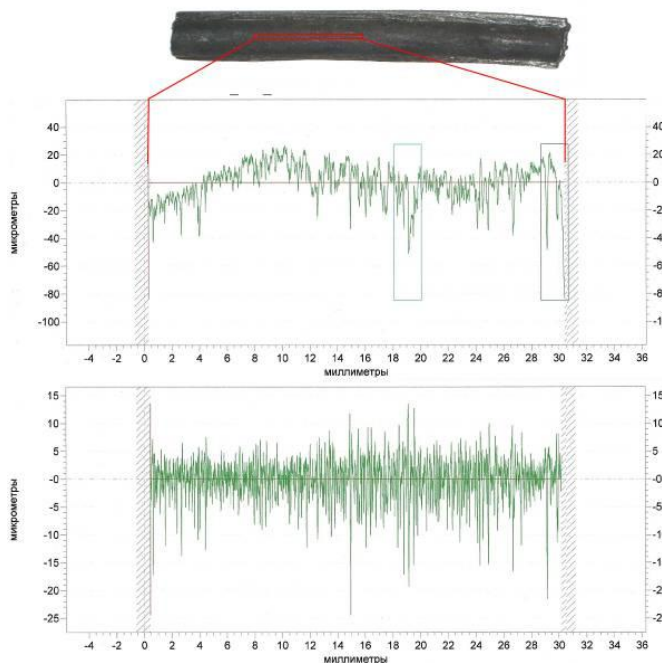


Рис. 11. Профилограмма (профиль (а) и шероховатость (б)) поверхности свинцовой пробки образца № 4.

Отделение (без каких-либо усилий) слитка замороженного свинца от внутренней поверхности стальной трубы в пристенном слое происходит вероятно по поверхностям газовых пузырьков и по газовым прослойкам на поверхностях несмачиваемых

теплоносителем образований и частиц примесей.

Из других экспериментов авторов известно, что свинец или свинец-висмут, смочившие участок стальной поверхности, от нее механически отделяются с большим трудом – соскабливанием или др.

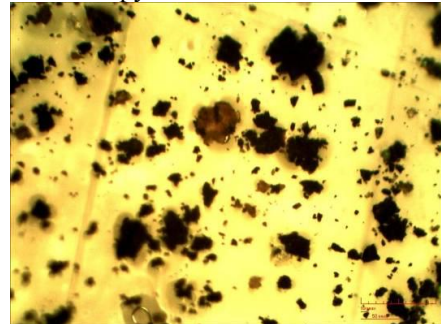


Рис. 12. Фото частиц примесей при 200 кратном увеличении под микроскопом (средняя площадь частиц  $\approx 120 \text{ мкм}^2$ , при относительном заполнении сфотографированной области  $\approx 20\%$ ).

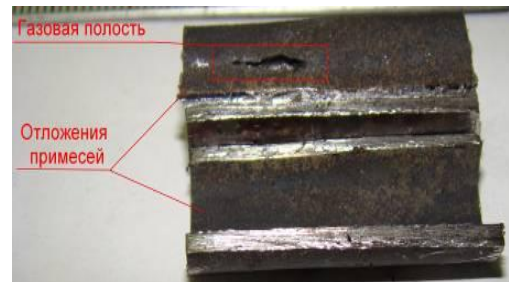


Рис. 13. Газовая полость.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что пристенная область свинцового теплоносителя в рассматриваемых условиях представляет собой дисперсную систему, состоящую из частиц размером до 1 мкм (высокодисперсную), не фиксируемых микроскопом и до ок.50 мкм (грубодисперсную). По признаку дисперсности, эту систему можно рассматривать как грубо- и высокодисперсную.

По агрегатному состоянию, по мнению авторов, дисперсные системы в пристенном слое тяжелых жидкометаллических теплоносителей представляют собой дисперсную среду – теплоноситель, содержащий дисперсную фазу твердую (Т/Ж) или газовую (парогазовую) (Г/Ж). По структуре – это свободно-дисперсные системы.

По межфазному взаимодействию свойства дисперсных систем в пристенных областях ТЖМТ существенно зависят как от состава и физико-химических свойств образований примесей, так и от режимных условий контура, в которых они находятся (температура).

Экспериментально не зафиксирован факт самопроизвольного диспергирования в таких системах, поэтому их можно считать лиотропными, но лиофилизированными в той или иной степени.

Образование дисперсных систем в пристенном слое потока тяжелых жидкометаллических теплоносителей возможно за счет механических способов, в которых преодоление межмолекулярных сил и накопление свободной поверхностной энергии в процессе диспергирования происходит вследствие механического истирания контактных поверхностей (хвостовиков твэл, трубной системы парогенераторов, подшипников скольжения насосов и др.), кавитационной энергии и др. Возможно также конденсационное выделение новой фазы из перенасыщенного раствора (в «холодных» участках контура и др.) например, оксидов теплоносителя. В отличие от физических методов, вещество, образующее дисперсную фазу, появляется в результате химических реакций. Таким образом, любая химическая реакция в реакторном контуре с ТЖМТ, идущая с образованием новой фазы, может быть источником получения коллоидной системы.

Накопление свободной поверхностной энергии при образовании дисперсной системы повышает вероятность обратного процесса – объединения частиц в агрегаты, концентрирующиеся в рассматриваемых условиях (в реакторном контуре ТЖМТ) в пристенных областях и на свободных уровнях теплоносителя.

Сформировавшаяся в пристенной области потока и застойных зонах тяжелого жидкометаллического теплоносителя дисперсная система может существенно изменять триботехнические характеристики контактных областей в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей.

Основными факторами, влияющими на эти характеристики является вязкость пристенного слоя, приобретающая неньютоновские свойства: наличие в зоне контакта рассмотренной выше дисперсной системы, обладающей смазывающими характеристиками, а также наличие оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкций.

Результаты этого анализа подтверждаются многолетним опытом эксплуатации авторами циркуляционных насосов стендов с высокотемпературными

свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями с подшипниками скольжения «сухого» трения в среде этих теплоносителей [2] при которых отсутствовали признаки возникновения заедания.

### Выводы

1. В зоне контакта стальных и чугунных поверхностей в среде высокотемпературного свинцового и свинец-висмутового теплоносителей при определенных условиях формируется область с характеристиками малоизносного или безизносного «сухого» трения, включающая оксидные покрытия на поверхностях конструкций и дисперсную систему с дисперсной средой – теплоносителем и дисперсную фазу (твердую – т/ж и/или газовую (паровую) – г/ж). Дисперсная система может рассматриваться как жидкостная смазка с неньютоновскими свойствами (частично).

2. Длительный опыт эксплуатации подшипников скольжения «сухого» трения в циркуляционных насосах высокотемпературных стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями подтверждает малый износ или его отсутствие при определенных условиях погружения, сохраняемых пристенную область с рассмотренными свойствами.

3. В энергетических контурах с инновационными реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями в режимах пуска, останова и при аварийных ситуациях в гидростатических подшипниках главных циркуляционных насосов при «сухом» трении поверхностей повышенный износ поверхностей происходить не будет.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В.Безносков, Ю.Г.Драгунов, В.И.Рачков Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / М.: ИздАт, 2007, с 434.
2. А.В.Безносков, М.А.Антоненков, П.А. Боков, О.О. Новожилова Особенности работы подшипников скольжения в тяжелых жидкометаллических теплоносителях ядерных энергетических установок. / Вестник машиностроения, №3, 2009, с 37-41.

## TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE CONTACT ZONES A COOLANTS OF NUCLEAR FAST REACTOR NUCLEAR POWER PLANT

© 2011 A.V. Beznosov<sup>1</sup>, Y.N. Drozdov<sup>2</sup>, T.A. Bocova<sup>1</sup>; O.O. Novozhilov<sup>1</sup>, M.V. Yarmonov<sup>1</sup>; K.A. Makhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University R.E.Alekseeva, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Institute RAS Blagonravov, Moscow

The article presents the results of analytical and experimental work on the tribological characteristics of the contact pairs in a heavy liquid metal coolants.

Key words: heavy liquid metal coolant, the contact layer, a structural material, freezing, material analysis, profiler

*Beznosov Alexander Viktorovich, Dr.Sci.Tech., professor, E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru*

*Drozdov Yury Nikolaevich, a Dr.Sci.Tech., the head of department, an E-mail: drozdov@imash.ac.ru*

*Bokova Tatyana Aleksandrovna, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, E-mail: ats@nntu.nnov.ru*

*Novozhilova Olga Olegovna, Cand.Tech.Sci., the assistant, E-mail: ats@nntu.nnov.ru*

*Jarmonov Michael Vladimirovich, the post-graduate student, E-mail: ats@nntu.nnov.ru*

*Mahov Cyril Andreevich, the post-graduate student, E-mail: ats@nntu.nnov.ru*