

Afanasyev Viktor Borisovich, candidate of technical sciences, head of the reliability department, vicbor54@bk.ru, Russia, Moscow, JSC GosNIIP,

Makhlaenko Sergey Andreevich, deputy, head of the mechanical assembly shop for production, makhlaenko@rambler.ru, Russia, Bryansk, JSC Bryansk Automobile Plant,

Plakhotnikova Elena Vladimirovna, doctor of technical sciences, professor, e_plakhotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ryazansky Valery Pavlovich, leading engineer-mathematician, kot-aldo@yandex.ru, Russia. Moscow, JSC GosNIIP

УДК 621.74

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-185-186

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ БРАКА ПРИ ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.К. Захаров, А.В. Анцев, И.Д. Калабин

В статье проведен анализ причин возникновения брака при литье по выплавляемым моделям с использованием системы компьютерного моделирования литейных процессов ПолигонСофт на примере детали «Вкладыш» из коррозионно-стойкой (нержавеющей) стали мартенситного класса 09X16H4Б. Была разработана и смоделирована литниково-питающая система с центральным стояком, рассчитанная на изготовление 4 отливок. Эффективность разработанной литниково-питающей системы определялась на основе анализа результата питания отливки через оценку распределения и величины усадочных дефектов (раковин и пористости) посредством модуля «Фурье» ПолигонСофт и общего анализа эффективности применения литниково-питающей системы типа «Центральный стояк» в литье отливки детали «Вкладыш». Расчет усадочных полей для блока отливок детали «Вкладыш» показал значительную дефектную область на одной из верхних отливок вследствие недостаточного количества объема металла в данной части всего блока отливок в целом и рассматриваемой отливки в частности. Сравнение результатов процесса моделирования с реальными условиями производства показало, что результаты моделирования образования дефектов усадочного характера являются вполне достоверными и позволяют оценить варианты возникновения и устранения данных дефектов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, литье по выплавляемым моделям, литейная форма, брак, пористость.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных керамических формах, изготавливаемых с использованием выплавляемых, выжигаемых или растворяемых моделей однократного использования [1].

Сущность способа получения отливок по выплавляемым моделям состоит в том, что модель отливки и модель литниковой системы изготавливают из легкоплавких материалов путем запрессовки их или заливки их в пресс-формы. Затвердевшую модель извлекают из пресс-формы, припаивают к литниковой системе, образуя модельный блок. На поверхность модельного блока наносят несколько слоев суспензии и обсыпки, которые после сушки создают на блоке высокоогнеупорную керамическую оболочку. Выплавив из оболочки модельный состав, получают тонкостенную оболочку литейной формы отливки. Полученную оболочку формуют в специальных неразъемных опоках, прокалывают и заливают расплавом [2].

Способ получения отливок по выплавляемым моделям дает возможность:

- получать отливки, максимально приближенные по форме и размерам с высокой чистотой поверхности;
- получать отливки с минимальным припуском на обработку из любых сплавов, в том числе не поддающихся ковке и штамповке и трудно обрабатываемых механической обработкой;
- объединять отдельные детали в компактные цельнолитые узлы;
- создавать конструкции (например, лопатки газотурбинных двигателей со сложными лабиринтными полостями газового тракта), невыполнимые какими-либо другими методами обработки.

Наиболее распространенными усадочными дефектами при литье сталей и сплавов (в том числе и в методе ЛВМ) являются усадочная раковина и усадочная пористость [3].

Усадочная раковина – это дефект в виде открытой или закрытой полости с грубой, шероховатой, иногда окисленной поверхностью, образование которой происходит вследствие усадки при затвердевании металла.

Усадочная пористость – дефект в виде мелких пор, образовавшихся вследствие усадки металла во время его затвердевания при недостаточном питании.

В данной работе была разработана и смоделирована литниково-питающая система (ЛПС) для изготовления детали «Вкладыш» (рис. 1) методом ЛВМ. Масса детали составляет 0,14 кг. Материал детали 09X16H4Б – коррозионно-стойкая (нержавеющая) обыкновенная сталь мартенситного класса. Расшифровка марки стали: 09 – 0,09 % углерода, Х16 – 16 % хрома, Н4 – 4 % никеля, Б – сталь легирована ниобием (Nb), который присутствует в стали в малом количестве. Данный материал находится в классе высокохромистых сталей (содержание хрома более 12 %). Подробный химический состав стали изложен в таблице 1.

За основу была принята ЛПС с центральным стояком [4, 5]. ЛПС данного типа является стояком компактного сечения, к которому с разных сторон присоединяются небольшие отливки с 1-2 индивидуальными питателями. Центральный стояк в данном случае является одновременно литниковым ходом и коллективной прибылью. Пи-

татели, в свою очередь, выполняют роль шеек прибылей. Применение унифицированного металлического каркаса в качестве несущей конструкции обеспечивает удобство звеньевой сборки модельного блока и его высокую прочность при изготовлении оболочковой формы.

Таблица 1

Химический состав стали 09Х16Н4Б ГОСТ 977-88 в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Nb
0,08-0,12	до 0,6	до 0,5	4-4,5	до 0,015	до 0,03	15-16,5	0,05-0,15

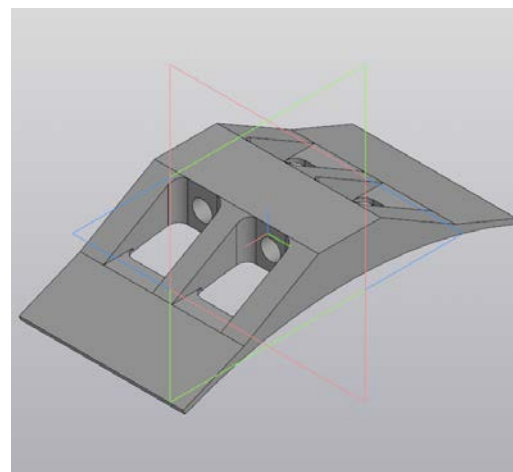
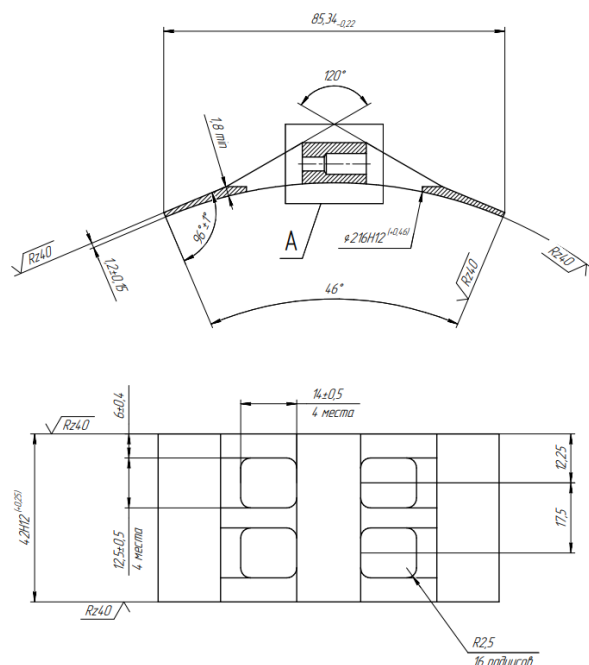


Рис. 1. Деталь «Вкладыш»: а – эскиз детали; б – 3Д-модель детали

Эскиз и трехмерная модель ЛПС представлены на рис. 2. Конструкция литниковой системы рассчитана на изготовление 4 отливок. Она включает в себя стояк с воронкой и 4 отливки с питателями.

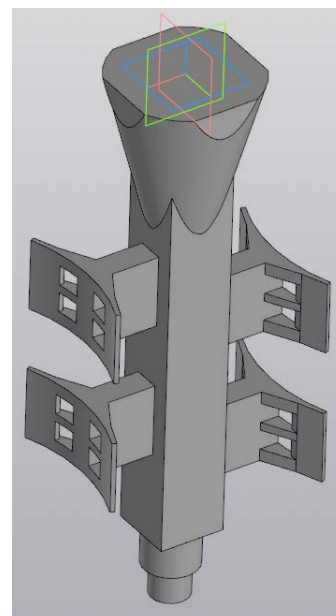
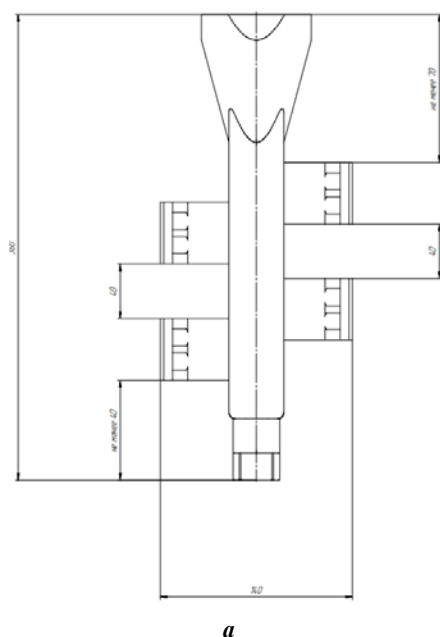


Рис. 2. Конфигурация ЛПС типа 1 (центральный стояк): а – эскиз ЛПС; б – 3Д-модель ЛПС

Элементы питания ЛПС были рассчитаны с учетом метода приведенных толщин Н.И. Хворинова [3, 6]. Кроме того, был произведен расчет литниковых каналов ЛПС на обеспечение заполняемости формы расплавом на основе методики, представленной в [1], а также на основе эскиза (см. рис. 1) была разработана конструкция литой заготовки целевого изделия.

Форма ЛВМ представляет собой оболочку, изготовленную из керамического состава на основе Al_2O_3 (ВИАМ) с толщиной слоя 4 мм. Параметры керамики на основе Al_2O_3 и кварцевого песка представлены в табл. 2.

Перед заливкой форма ЛВМ нагревается до $900^\circ C$ и размещается в резервуаре с кварцевым песком. Заполнение формы расплавом осуществляется из разливочного ковша со средней скоростью струи 2,5 м/с.

Таблица 2

Параметры керамики на основе Al_2O_3 (ВИАМ) и кварцевого песка

Параметр	Значение
Керамический состав на основе Al_2O_3 (ВИАМ)	
Теплоемкость, кДж/(м ³ ·°K)	3125 – 5625
Теплопроводность, Вт/(м·°K)	2,2
Кварцевый песок с размером частиц 0,2 – 0,3 мм и плотностью 1630 кг/м ³	
Теплоемкость, кДж/(м ³ ·°K)	1207 – 2174
Теплопроводность, Вт/(м·°K)	0,35 – 0,8

Эффективность разработанной ЛПС определялась на основе решения следующих задач:

1) анализ результата питания отливки через оценку распределения и величины усадочных дефектов – раковин и пористости;

2) общий анализ эффективности применения ЛПС типа «Центральный стояк» в литье отливки детали «Вкладыш».

Трехмерные геометрические модели блока отливок, керамической оболочки и опорного наполнителя были разработаны с использованием среды компьютерного моделирования КОМПАС 3D на основе эскиза, представленного на рис. 2.

Далее была нанесена сетка конечных элементов, которая необходима для функционирования трехмерных объектов в среде СКМ ЛП ПолигонСофт (рис. 3). Сгенерирована данная сетка была с помощью модуля «Mesh» сеточного генератора «Salome» (Франция) [7, 8], который является основным для СКМ ЛП ПолигонСофт.

Сетка была создана с подсетками для более точного расчета целевых изделий – отливок детали «Вкладыш».

Параметры сетки и подсеток МКЭ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры сгенерированной сетки и подсеток МКЭ

Параметр	Значение	
	Сетка	Подсетка
Алгоритм	NETGEN 1D - 2D - 3D	
Точность	грубо	грубо
Скорость роста	0,5	0,5
Максимальный размер ячейки	2	10
Минимальный размер ячейки	0,5	1
Количество сегментов на ребро	0,5	0,5
Количество сегментов на радиус	1,5	1,5
Результат генерации сетки и подсеток		
Количество узлов	13257	
Количество ребер	6413	
Количество граней	24399	
Количество объемных фигур	40422	

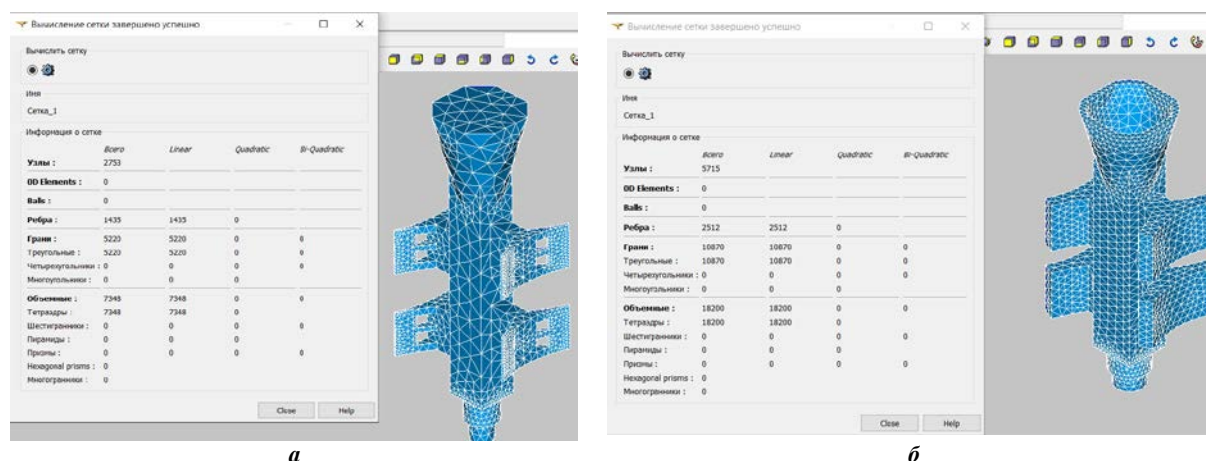


Рис. 3. Результат генерации сетки в модуле «Mesh» программы «Salome»: а – блок отливок; б – керамическая оболочка

Далее в среде СКМ ЛП ПолигонСофт с помощью добавления сохраненных сеточных элементов формируется общая расчетная модель, представляющая собой многослойную конструкцию, представленную на рис. 4.

Анализ результата питания отливки через оценку распределения и величины усадочных дефектов выполнен посредством модуля «Фурье» СКМ ЛП ПолигонСофт. В качестве исходных данных были заданы параметры расплава (файл bd), параметры формы (файл bdf) и условия теплопередачи (файл afo), а также внешнее давление, соответствующее атмосферному (0,1 МПа).

Результаты расчета образования усадочных дефектов представлены в конечной стадии процесса на рис. 5.

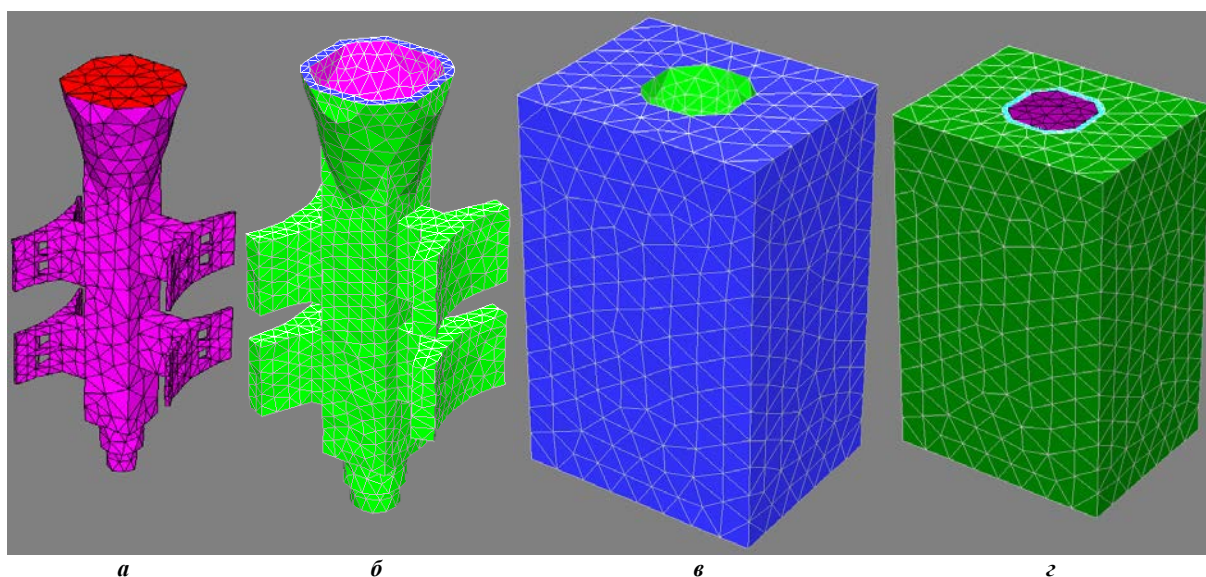


Рис. 4. Фрагменты расчетной модели: а – блок отливок в режиме индексов поверхностей; б – керамическая оболочка в режиме индексов поверхностей; в – опорный наполнитель в режиме индексов поверхностей; г – расчетная модель в режиме индекса объемов

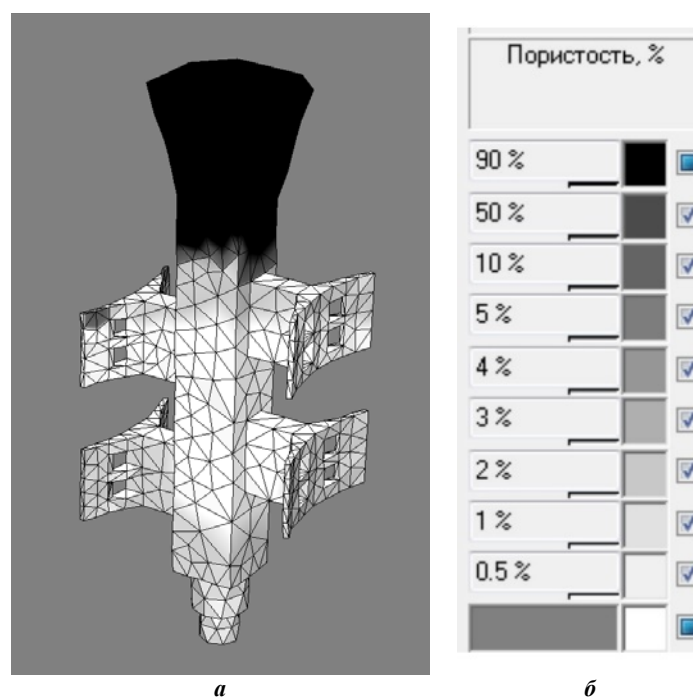


Рис. 5. Результат расчета образования усадочных дефектов и их распределение в конечной стадии процесса (а) со шкалой пористости (б)

Наблюдается значительное поражение дефектными образованиями всей поверхности литниковой воронки и верхней части стояка (90 %). Стоит отметить, что данное явления типично при литье, так как металл в литниковой воронке имеет непосредственный контакт с открытым воздухом, из-за чего происходят окислительные реакции и попадание пузырьков газа в металл [9].

Крайне заметны дефекты на второй сверху отливке, в которой, предположительно пористостью, сильно поражена ее тонкая верхняя часть. По цветовой шкале поражение составляет более 10%, что, вероятно, приводит данную отливку в категорию бракованных.

Причиной появления дефекта данного рода в этом месте может быть множество условий, но если рассматривать данную ситуацию именно со стороны усадочной природы явления, то причиной может послужить недостаточное количество объема металла в данной части блока и отливки в частности [10]. Как было сказано ранее, стояк в данной ЛПС играет роль прибыли, однако в данном случае для некоторых отливок ее может быть недостаточно.

Также присутствует значительная область с небольшой пористостью в нижней части блока. Однако значение этой пористости составляет менее 2%, что позволяет не принимать ее в расчет.

Подводя итоги по расчету усадочных полей для блока отливок детали «Вкладыш» необходимо отметить значительную дефектную область на одной из верхних отливок. При сравнении результатов процесса моделирования с реальными условиями производства были получены данные о том, что некоторый процент брака в данных отливках связан с дефектами пористого характера в областях тонких сечений. Данный факт говорит о том, что результаты моделирования образования дефектов усадочного характера являются вполне достоверными и позволяют оценить варианты возникновения и устранения данных дефектов.

Таким образом, эффективность данной ЛПС была проверена по результатам моделирования образования усадочных раковин и пористости в СКМ ЛП ПолигонСофт.

Список литературы

1. Руссиян С.В., Голованов Н.Н. Производство точного литья по выплавляемым моделям. Л.: Судпромгиз, 1958. 346 с.
2. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.
3. Литье по выплавляемым моделям / Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. [и др.]; под общей редакцией Я.И. Шкленника и В.А. Озерова. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
4. Лященко Н.Н. Литниково-питающие системы при литье по выплавляемым моделям // Сб. ВПТИ Минтрансаш «Вопросы точного литья», 1956. Вып. 16.
5. Кондратьев Ю.П. Конструирование литых деталей и оснастки для литья по выплавляемым моделям. Л.: Судпромгиз, 1960. 199 с.
6. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. М.: Машгиз, 1958. 392 с.
7. Сетка в Salome 8 // Конструкторский сайт Д. Денисова [Электронный ресурс] URL: <https://конструкторский.рф/2018/01/13/сетка-в-salome-8> (дата обращения: 20.06.2024).
8. Создание трехмерных объектов и их разбиение на конечные элементы в Salome // «Ладуга». Инженерные услуги [Электронный ресурс]. URL: https://laduga.ru/salome/tutorial_geometry.shtml (дата обращения: 20.06.2024).
9. Рабинович Б.В. Введение в литейную гидравлику: Свойства расплавов. Особенности течения. Литниковые системы. М.: Машиностроение, 1966. 423 с.
10. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.

Захаров Сергей Константинович, канд. техн. наук, доцент, zzzsk1971@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Анцев Александр Витальевич, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, a.antsev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Калабин Иван Дмитриевич, магистрант, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DEFECTS IN INVESTMENT CASTING USING A COMPUTER SIMULATION SYSTEM

S.K. Zakharov, A.V. Antsev, I.D. Kalabin

The article analyzes the causes of defects in investment casting using the PolygonSoft computer modeling system for casting processes using the example of the «Insert» part made of corrosion-resistant (stainless) martensitic steel grade 09X16H4B. A gating and feeding system with a central riser designed for the manufacture of 4 castings was developed and simulated. The efficiency of the developed gating and feeding system was determined based on the analysis of the casting feeding result through the assessment of the distribution and size of shrinkage defects (cavities and porosity) using the PolygonSoft Fourier module and the general analysis of the efficiency of using the gating and feeding system of the Central Riser type in casting the «Insert» part casting. The calculation of shrinkage fields for the block of castings of the «Insert» part showed a significant defective area on one of the upper castings due to an insufficient amount of metal volume in this part of the entire block of castings as a whole and the considered casting in particular. Comparison of the results of the modeling process with real production conditions showed that the results of modeling the formation of shrinkage defects are quite reliable and allow us to assess the options for the occurrence and elimination of these defects.

Key words: computer modeling, investment casting, casting mold, defects, porosity.

Zakharov Sergey Konstantinovich, candidate of technical science, docent, zzzsk1971@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antsev Alexander Vitalyievich, doctor of technical science, docent, head of the department, a.antsev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kalabin Ivan Dmitrievich, master's student, Russia, Tula, Tula State University