

УДК 621.7-216:62-216.57:621.747.015

## Повышение эксплуатационных характеристик литых станин и корпусных деталей на стадии их изготовления

А.Г. Ягопольский<sup>1</sup>, А.Ю. Куцай<sup>1</sup>, О.М. Савохина<sup>1</sup>, А.Н. Зайцев<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1<sup>2</sup> ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН», 101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4

## Improving the performance of cast housings and stationary base members at the production stage

A.G. Jagopol'skiy<sup>1</sup>, A.Y. Kutsaya<sup>1</sup>, O.M. Savokhina<sup>1</sup>, A.N. Zaytsev<sup>2</sup><sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> Research Institute for Machine Science n. a. A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences, Malyy Khariton'evskiy Pereulok, 4, 101990, Moscow, Russian Federation

e-mail: fortor@mail.ru, savokhina@mail.ru, skadi221@gmail.com



Повышение эксплуатационных характеристик литых станин путем анализа литейных дефектов, совершенствования диагностики и предотвращения таких дефектов является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо разработать комплексную методику литья станин технологических машин, использование которой позволит сократить брак при литье базовых корпусных деталей (станин). Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик при изготовлении литых станин и корпусных деталей технологических машин. Проанализированы наиболее характерные поверхностные дефекты и дефекты в структуре металла, образующиеся при литье станин и корпусных деталей. Определены и проанализированы причины появления дефектов. Описаны методы предотвращения литейных дефектов и сокращения брака выпускаемой продукции. Предложен алгоритм диагностики, основанный на обобщенном методе описания закономерностей формирования и протекания процессов, происходящих при затвердевании расплавленного металла при изготовлении литой станины технологической машины.

**Ключевые слова:** технологическая машина, литейные дефекты, станина, алгоритм диагностики, эксплуатационные характеристики.



Improving the performance of cast housings by analyzing casting defects, improving the diagnosis, and preventing these defects is of great importance. To solve this problem, it is necessary to develop a complex technique for casting the housings of technological machines in order to reduce their rejects. The questions of improving the performance of cast housings and stationary base members of technological machines are considered. The most typical surface defects and the defects in a metal structure formed by casting housings and stationary base members are analyzed. The causes of defects are revealed. Techniques for preventing casting defects and reducing the rejects of products are described. A diagnostic algorithm based on the generalized method for describing the principles of solidification of molten metal during manufacturing cast housings of technological machines is proposed.

**Keywords:** technological machines, casting defects, stationary base member, diagnostic algorithm, performance.

Стабильный уровень надежности технологических машин и оборудования (металлорежущих станков, литейных машин, кузнечно-прессового оборудования, прокатных станов, сварочных роботов и др.) позволяет изготавливать высококачественную и конкурентоспособную продукцию, пользующуюся широким спросом, как на внутреннем, так и на внешнем рынке [1].

Обеспечение стабильного уровня надежности и работоспособности технологических машин зависит от множества различных факторов и процессов, происходящих в самой технологической машине. Надежность технологической машины — это динамика ее качества, так как рассматриваются изменения выходных характеристик и параметров технологической машины во времени. Негативные процессы, приводящие к отказам и нарушению работоспособности технологической машины, следует классифицировать по скорости их протекания и анализировать картину взаимодействия технологической машины с этими процессами. Для оценки степени изменения надежности технологической машины во времени целесообразно все процессы, происходящие в самой машине и изменяющие ее первоначальные эксплуатационные характеристики и параметры, разделить на три группы по скорости их протекания [2]. Процессы, действующие при эксплуатации на технологическую машину, представлены на рис. 1.

Цель работы — разработка алгоритма диагностики для изготовления литой станины.

Быстропротекающие процессы (вибрация узлов и механизмов, изменение сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и др.) возникают в пределах цикла работы машины.

Процессы средней скорости (тепловые деформации, изменения параметров окружающей

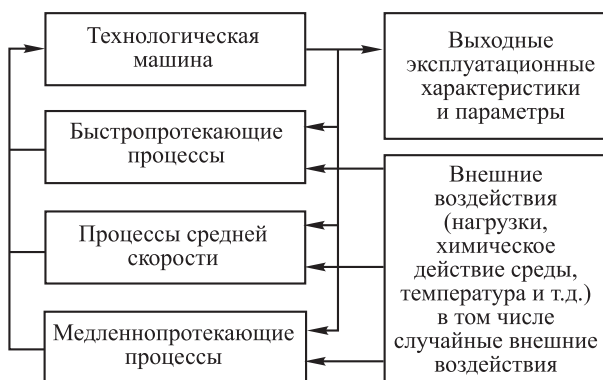


Рис. 1. Процессы, действующие на технологическую машину при ее эксплуатации

среды, износ и коррозия некоторых малостойких элементов и др.) протекают за время непрерывной работы машины в течение смены.

Медленнопротекающие процессы (изнашивание, коррозия, перераспределение внутренних напряжений, ползучесть материалов и др.) наблюдаются в течение всего периода эксплуатации технологической машины. Они, как правило, проявляются на станинах и корпусных деталях, существенно снижая и ухудшая эксплуатационные характеристики всей технологической машины, которые непосредственно влияют на баланс формирования погрешностей при изготовлении и обработке изделий, производимых на технологической машине и, следовательно, снижают надежность и качество технологической машины в целом.

Одной из ответственных частей любой технологической машины является станина — основная базовая корпусная часть машины, на которой монтируются ее рабочие узлы и механизмы, и от прочности, жесткости и износостойкости которой зависит качество работы всей машины [3]. Станина обеспечивает точное взаимное расположение всех основных узлов технологической машины и воспринимает усилия, действующие при работе этих узлов и механизмов. Например, для металлорежущих станков важнейшими требованиями к станине являются износостойкость, стабильность геометрической формы и жесткость [3–5]. Один из основных процессов, ухудшающих технические параметры станка, — изнашивание направляющих, которые являются составной частью литой станины, так как на протяжении всей работы станка направляющие должны соответствовать критерию неизменности формы. Процесс изнашивания приводит к нежелательному изменению траектории движения суппорта, что в свою очередь, обуславливает появление погрешностей при изготовлении конечной продукции.

Подавляющее большинство станин металлорежущего оборудования изготавливают методами литья из чугуна. Наиболее распространен серый чугун [4, 6], однако в последнее время все большее применение находят и другие виды чугунов. Направляющие, являясь неотъемлемой частью станины, изготавливают из серого чугуна, поскольку они должны иметь высокую износостойкость, так как во время работы металлорежущего станка по ним перемещаются подвижные органы станка. Многолетние наблюдения и исследования позволили установить, что при прочих равных условиях направляющие изнашиваются медленнее, если структура чугуна

приближена к перлитной и удельное давление на трущиеся поверхности выше [7, 8].

Одна из важных задач литейного производства по повышению эксплуатационных характеристик литых станин — обеспечение надлежащей структуры и твердости в литых станинах, которые возможно реализовать различными способами [8]. Одним из наиболее эффективных способов является подбор состава металла и скорости охлаждения отливок. Особенно важно правильно подобрать легирующие компоненты, обеспечивающие дисперсность перлита и микротвердость чугуна.

Существенное влияние на требуемую структуру чугуна литой станины оказывает и скорость ее охлаждения [7]. Для выравнивания скоростей охлаждения различных участков отливки и, следовательно, уменьшения температурных напряжений, применяют подогрев формы или специальные формовочные смеси с низкой теплопроводностью и экзотермические формовочные смеси для облицовки тонких стенок отливки. Для регулирования скорости охлаждения массивных тепловых (термических) узлов отливки используют внутренние и наружные холодильники. Наружные холодильники должны быть не сплошными, а в виде отдельных плиток, брусков и т. д. Зазоры между отдельными холодильниками необходимо тщательно заделывать во избежание появления заливов. Для крупных отливок желательнее применять плоские холодильники. При охлаждении криволинейных поверхностей холодильники выполняют по их контуру. В средних по габаритам отливках холодильники, создавая резкое переохлаждение металла, способствуют возникновению в чугуне междендритного и сетчатого графита и образованию структурно-свободного феррита или цементита. Поэтому в средних, а иногда и больших по массе отливках их заменяют шилевидными, ребристыми или карборундовыми с меньшей теплопроводностью. Такие холодильники обеспечивают требуемую графитовую структуру чугуна в отливках.

Эффективность методов принудительного охлаждения отливок, как средства снижения остаточных напряжений и сокращения технологического цикла, существенно возрастает при автоматическом регулировании процесса охлаждения отливки. Одной из наиболее простых и надежно реализуемых является система, в которой регулирующим параметром автоматически служит разность температур между основными элементами отливки, т. е. тонкой стенкой, и массивной направляющей. Температура

фиксируется дифференциальной термопарой, образованной двумя термопарами, которые установлены соответственно в стенке и направляющей отливки.

Другой важной задачей производства станин технологических машин, связанной с повышением их эксплуатационных характеристик, является сокращение брака при литье. Работа по предотвращению брака при литье заключается в анализе дефектов, определении причин их возникновения и выполнении процедур по предупреждению дефектов. В процессе литья станин возникают разнообразные дефекты, которые можно классифицировать по внешнему виду, местоположению в отливке, по размерам и пр., например: пригар; складчатость; газовые и усадочные раковины; ситовидная и усадочная пористость; горячие трещины; неслитины; недоливы; приливы; искажение размеров и формы отливок; неметаллические включения в отливках; несоответствие состава, структуры и свойств и др. [7, 9, 10].

*Пригар* — поверхностный слой отливки, состоящий из оплавленных частиц формовочных материалов, пропитанных основным сплавом, оксидами его компонентов и продуктами их взаимодействия с составляющими формовочной смеси. Пригар образуется при проникновении сплава в поры формы под действием капиллярных сил и давления металла на стенки формы. Первая стадия процесса образования пригара — проникновение расплава в поры формы, вторая стадия — химическое взаимодействие оксидов металла, присутствующих в расплаве (оксидов железа и легирующих элементов), и оксидов, содержащихся в формовочных материалах. Химическое взаимодействие расплава и формы усиливает проникновение металла в поры формы.

Для предупреждения химического пригара на отливках из чугуна формы и стержни покрывают графитовой или графито-коксовой краской. Добавка в краску кокса или графита предотвращает образование оксидов на поверхности отливки. Замена в формовочных смесях кварцевого песка хромомagneзитом или цирконом такого же зернового состава, но имеющих более высокую охлаждающую способность, также уменьшает механический пригар и снижает глубину его проникновения в расплав примерно вдвое.

*Складчатость* — беспорядочно расположенные «сморщенные» участки и углубления с бесформенными краями. При высоких температурах в форме в процессе заливки возможен

пиролиз, т. е. процесс разложения углеводородов. Блестящий, или вторичный, углерод, образовавшийся в процессе высокотемпературного разложения летучих продуктов коксования, прочно сцепляется с другими инертными веществами, покрывает тонким слоем кварцевые зерна вблизи границы раздела и может оседать на поверхности заполняющего форму расплава. Количество блестящего углерода на поверхности металла зависит от массовой доли глины в формовочных смесях, плотности набивки форм, что, в свою очередь, влияет на газопроницаемость смеси и препятствует отводу продуктов разложения органических веществ из формы.

Существует два способа предотвращения складчатости:

1) предупреждение образования блестящего углерода и его контакта с расплавом;

2) интенсифицированный отвод газообразных продуктов из полости формы, для чего следует повышать газопроницаемость формовочной смеси и улучшать вентиляцию форм.

*Газовые раковины* — одиночные и групповые полости в теле отливки, образованные выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами. Механизм образования газовых раковин и методы их предупреждения связаны с источником газообразования. Если газы выделяются из форм и стержней, то дефект образуется в результате механического проникновения газа в жидкий расплав с поверхности раздела металл–форма. В литейной форме происходит сравнительно быстрое охлаждение жидкого металла, вначале он затвердевает на поверхности, а затем по всему сечению стенки отливки. При образовании затвердевшей корки металла удаление пузырей газа из тела отливки практически невозможно. Газы также могут проникать в отливку в результате замешивания при заливке.

Для предотвращения газовых раковин следует уменьшать газотворность смесей и стержней, увеличивать скорость отвода газов из форм, способствовать удалению из отливки внедрившихся газовых пузырей до момента ее полного затвердевания. Для этого необходимо определять оптимальный состав формовочных и стержневых смесей. Смеси должны содержать минимальное количество газотворных материалов — воды, органических связующих, противопригарных добавок, глины, извести и т. п.

Действенным способом снижения газовой выделения при заливке является высушивание и прокаливание стержней и форм. При этом из них почти полностью удаляется вода и частичные летучие продукты из связующего материала.

Повышение скорости отвода газов из форм и соответственно снижение давления газа достигается за счет уменьшения длины пути фильтрации газов, для чего необходимо предусматривать вентиляционные каналы в форме и стержне. Для удаления газовых пузырей из жидкого металла эффективно и повышение температуры заливаемого металла. С повышением температуры вязкость расплава уменьшается, а время до образования корки металла увеличивается. Таким образом, при повышенной температуре заливки сплава увеличивается время, в течение которого возможно удаление пузырей газа из отливки.

*Ситовидная пористость* — вытянутые раковины с гладкими стенками, расположенные непосредственно под литейной коркой по всей отливке или в отдельной ее части, перпендикулярно к поверхности отливки. Отдельные раковины могут выходить на поверхность. Основной способ предотвращения ситовидной пористости заключается в раскислении сплава с избытком раскисляющих добавок, достаточных для связывания кислорода, попадающего в расплав за время между выпуском его из печи и окончанием заполнения формы. Также эффективным способом предотвращения этого дефекта является сокращение пути движения жидкого металла в форме за счет уменьшения длины элементов литниковой системы. Количество ситовидной пористости в отливках резко снижается при использовании стержневых связующих, не содержащих азота.

*Усадочные раковины* — открытые или закрытые полости в теле отливки, имеющие шероховатую грубую кристаллическую поверхность со следами дендритов.

*Усадочная пористость* — мелкие полости, расположенные между дендритами сплава по всему объему отливки или в ее центральных частях.

Усадочные раковины в отличие от усадочной пористости имеют сравнительно большие размеры. Усадочные раковины обычно образуются в утолщенных местах отливки, которые затвердевают в последнюю очередь. Как правило, за счет ликвации при затвердевании отливки металл в усадочной раковине имеет повышенное содержание серы и фосфора.

*Усадка* — естественный процесс сокращения объема и линейных размеров, происходящий в остывающей отливке. Предотвратить ее невозможно, поскольку объем жидкого металла в форме всегда больше объема металла затвердевшей отливки. Методы предотвращения уса-

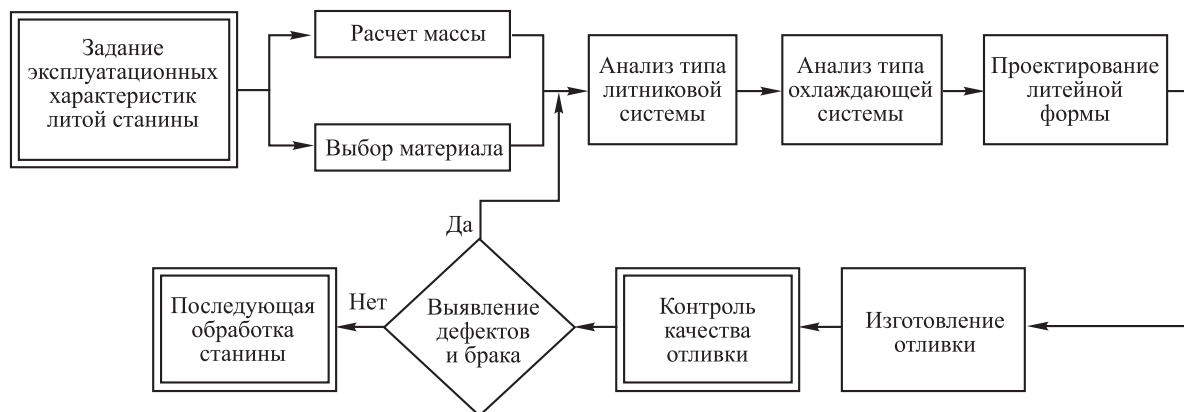


Рис. 2. Технологическая схема изготовления литой станины

дочных дефектов сводятся к созданию таких условий затвердевания, при которых недостаток жидкого металла в кристаллизующейся отливке или в отдельных ее узлах восполняется путем подвода дополнительного жидкого металла. Дополнительный подвод металла к месту образования усадочных дефектов должен быть непрерывным и продолжаться до полного затвердевания отливки, следовательно, кристаллизующийся слой отливки должен быть в контакте с жидким металлом. Для компенсации усадки отливок используют приемы, т.е. искусственные емкости жидкого металла.

*Горячие трещины* — внутренние напряжения, возникающие в отливке. В процессе затвердевания отливки температура отдельных ее участков никогда не бывает одинаковой. Температура поверхности отливки всегда ниже, чем внутренних слоев, тонкие стенки остывают быстрее толстых. Стержни, окруженные металлом, быстро прогреваются и затрудняют отвод тепла от соприкасающихся с ними стенок отливки, а части отливок, примыкающие к литниковой системе и прибылям, остывают медленнее. Поскольку температура и скорость охлаждения отдельных участков одной и той же отливки не одинаковые, то и величина их усадки должна быть различной, однако все части отливки являются единой жесткой системой и размеры их не могут изменяться независимо одна от другой. Одни элементы отливки, препятствуя свободной усадке других, оказывают друг на друга силовое воздействие. В результате в отливке возникают внутренние напряжения, вследствие которых образуются трещины.

Предотвращение горячих трещин возможно путем обеспечения минимальных перепадов температуры в стенках и отдельных частях отливки в период ее затвердевания и дальнейшего охлаждения. В связи с этим большое значение

имеет правильное конструирование отливок с целью обеспечения условий одновременного затвердевания и остывания их стенок и отсутствия тепловых (термических) узлов. Практически это требование выполнить трудно, однако необходимо стремиться к тому, чтобы разница толщин сопрягающихся стенок была минимальной. Чем больше толщина стенок отливки и больше разница толщин отдельных ее частей, тем больше и напряжения при прочих равных условиях. Предотвращению горячих трещин также способствует создание податливой формы [11–13].

Учитывая перечисленные выше факторы, влияющие на процесс изготовления литых станин и корпусных деталей технологических машин, а также высокие технологические требования, предъявляемые к станинам, на рис. 2 предложен алгоритм изготовления литой станины.

В настоящее время существуют различные методы диагностики и предотвращения дефектов в отливках станин и корпусных деталях технологических машин, основанные на обобщенном методе описания закономерностей формирования и протекания процессов, происходящих при затвердевании расплавленного металла. Вместе с тем методы оценки и обнаружения дефектов требуют дальнейших исследований и развития. Предполагается проведение исследований с различными вариантами заливки литейной формы, разработка сложной системы, решающей возникающие проблемы в комплексе, чтобы создать комплексную методику литья станин технологических машин.

## Выводы

1. От эксплуатационных характеристик станины, заложенных на стадии ее изготовления,

зависит качество работы всей технологической машины в целом.

2. Важной задачей производства станин (повышение ее эксплуатационных характеристик, предотвращение или возможно максимальное сокращение брака при литье) является анализ дефектов, определение причин их возникновения и создание процедур по предупреждению этих дефектов.

3. Наиболее распространенным видом чугуна для литья станин остается серый чугун, а существенное влияние на требуемую структуру

серого чугуна оказывает скорость охлаждения литой станины, которая может достигаться различными способами.

4. Предложена схема изготовления литой станины, отражающая стадии проектирования и анализ технологического процесса создания литой станины и позволяющая контролировать качество отливки на всех стадиях, основанная на закономерностях формирования и протекания процессов затвердевания расплавленного металла.

## Литература

- [1] Черпаков Б.И., Кашепава М.Я. Концепция развития инновационного станкостроения России до 2010 года. *Станкостроение: базовые и информационные технологии. Сб. научн. тр. ЭНИМС*. Москва, ОАО «Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков», 2001, с. 3–13.
- [2] Проников А.С. *Параметрическая надежность машин*. Москва, Машиностроение, 2002. 592 с.
- [3] Кирилин Ю.В. *Расчет и проектирование базовых деталей и несущей системы металлорежущих станков*. Ульяновск, УлГТУ, 2009. 76 с.
- [4] Мухин А.В., Спиридонов О.В., Схиртладзе А.Г., Харламов Г.А. *Производство деталей металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 2001. 560 с.
- [5] Черпаков Б.И., Вереина Л.И. *Технологическое оборудование машиностроительного производства*. Москва, Изд. центр «Академия», 2013. 448 с.
- [6] Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. *Технология литейного производства: Специальные виды литья*. Москва, Изд. центр «Академия», 2008. 352 с.
- [7] Гарбер М.Е. *Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация*. Москва, Машиностроение, 2010. 280 с.
- [8] Чернышев Е.А. *Литейные сплавы и их зарубежные аналоги. Справочник*. Москва, Машиностроение, 2006. 336 с.
- [9] Чернышев Е.А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А. *Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления*. Москва, Машиностроение, 2008. 282 с.
- [10] Давыдов Н.И. *Литейные противопожарные покрытия: справочник*. Москва, Машиностроение, 2009. 240 с.
- [11] Haddad H., Al Kobaisi M. Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision tool machines. *Composites: Part B*, 2012, vol. 43, iss. 8, pp. 3061–3068.
- [12] Cortés, F., Castillo G. Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, iss. 5, pp. 1461–1466.
- [13] Schmitz T.L., Ziegert J.C., Zapata R., Canning J.S. Part Accuracy in High-Speed Machining: Preliminary Results. *Proceedings of MSEC2006. 2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering (October 8–11, 2006)*. Ypsilanti, MI, 2006, pp. 1–8.

## References

- [1] Cherpakov B.I., Kashepava M.Ia. Kontseptsiiia razvitiia innovatsionnogo stankostroeniia Rossii do 2010 goda [The concept of development of innovative machine tool Russia until 2010]. *Stankostroenie: bazovye i informatsionnye tekhnologii. Sb. nauchn. trudov ENIMS* [Stankostroenie: basic and Information Technology: Proceedings of the ENIMS]. Moscow, ОАО «Eksperimental'nyi nauchno-issledovatel'skii institut metallorzhushchikh stankov», 2001, pp. 3–13.
- [2] Pronikov A.S. *Parametricheskaia nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of the machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 592 p.

- [3] Kirilin Iu.V. *Raschet i proektirovanie bazovykh detalei i nesushchei sistemy metallorezhushchikh stankov* [Calculation and design of basic parts and the support system of machine tools]. Ul'ianovsk, USTU publ., 2009. 76 p.
- [4] Mukhin A.V., Spiridonov O.V., Skhirtladze A.G., Kharlamov G.A. *Proizvodstvo detalei metallorezhushchikh stankov* [Production of parts of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2001. 560 p.
- [5] Cherpakov B.I., Vereina L.I. *Tekhnologicheskoe oborudovanie mashinostroit'nogo proizvodstva* [Process equipment engineering production]. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiia» publ., 2013. 448 p.
- [6] Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Tekhnologiya liteinogo proizvodstva: Spetsial'nye vidy lit'ia* [Technology foundry: Special types of casting]. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiia» publ., 2008. 352 p.
- [7] Garber M.E. *Iznosostoikie belye chuguny: svoistva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiia* [Wear-resistant white cast iron: properties, structure, technology, operation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2010. 280 p.
- [8] Chernyshev E.A. *Liteinye splavy i ikh zarubezhnye analogi. Spravochnik* [Casting alloys and their foreign counterparts. Directory]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006. 336 p.
- [9] Chernyshev E.A., Evstigneev A.I., Evlampiev A.A. *Liteinye defekty. Prichiny obrazovaniia. Sposoby preduprezhdeniia i ispravleniia* [Casting defects. Causes of education. Methods of prevention and correction]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 282 p.
- [10] Davydov N.I. *Liteinye protivoprigarnye pokrytiia: spravochnik* [Casting anticorcorching cover: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009. 240 p.
- [11] Haddad H., Al Kobaisi M. Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision tool machines. *Composites: Part B*, 2012, vol. 43, iss. 8, pp. 3061–3068.
- [12] Cortés, F., Castillo G. Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, iss. 5, pp. 1461–1466.
- [13] Schmitz T.L., Ziegert J.C., Zapata R., Canning J.S. Part Accuracy in High-Speed Machining: Preliminary Results. *Proceedings of MSEC2006. 2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering (October 8–11, 2006)*, Ypsilanti, MI, 2006, pp. 1–8.

Статья поступила в редакцию 23.01.2015

## Информация об авторах

**ЯГОПОЛЬСКИЙ Александр Геннадиевич** (Москва) — старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**КУЦАЯ Александра Юрьевна** (Москва) — старший преподаватель кафедры «Литейные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: fortor@mail.ru).

**САВОХИНА Ольга Михайловна** (Москва) — ассистент кафедры «Литейные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: savokhina@mail.ru).

**ЗАЙЦЕВ Андрей Николаевич** (Москва) — аспирант ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: skadi221@gmail.com).

## Information about the authors

**JAGOPOL'SKIY Aleksandr Gennadievich** (Moscow) — Senior Lecturer of «Metal-Cutting Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, Building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

**KUTSAYA Aleksandra Yur'evna** (Moscow) — Senior Lecturer of «Foundry Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, Building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: fortor@mail.ru).

**SAVOKHINA Ol'ga Mikhaylovna** (Moscow) — Assistant of «Foundry Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, Building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: savokhina@mail.ru).

**ZAYTSEV Andrey Nikolaevich** (Moscow) — Post-Graduate of Research Institute for Machine Science n. a. A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences (IMASH RAN, Malyy Khariton'evskiy Pereulok, 4, 101990, Moscow, Russian Federation, e-mail: skadi221@gmail.com).