Д. т. н. **Д. В. Харитонов**[1,2], д. х. н. **А. В. Беляков**[2] (✉), **Д. А. Анашкин**[1,2]

[1] *АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» имени А. Г. Ромашина», г. Обнинск Калужской обл., Россия*

[2] *ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия*

УДК 666.266.6.001.8

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ «БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА» ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕЛКИХ СЕРИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ. 3. Результаты проведенного анализа и пути уменьшения количества дефектов*

Приведены примеры использования инструментов «бережливого производства» (диаграмма Парето, причинно-следственная диаграмма Исикавы и т. п.) для анализа проблем, возникающих при мелкосерийном наукоемком производстве изделий из стеклокерамики. Выявлены причины возникновения дефектов, показано влияние вспомогательных стадий на количество и качество выявляемых дефектов. Предложены и обоснованы некоторые пути устранения выявленных проблем.

Ключевые слова: *«бережливое производство», изделия из стеклокерамики, производительность, критические дефекты, диаграмма Парето, диаграмма Исикавы.*

В предыдущих статьях [1, 2] было показано, что использование принципов и инструментов «бережливого производства» предоставляет новые возможности для поиска проблемных мест в технологии и упрощает выработку наиболее рациональных и перспективных путей ее дальнейшей оптимизации. Главный принцип «бережливого производства» — открытое признание проблем [3] позволяет изменить отношение рабочего коллектива к действиям после обнаружения дефектов и стимулирует работу по улучшению технологии для повышения качества выпускаемой продукции. Наибольший экономический вред приносят дефекты, выявленные на финальных стадиях потока создания ценности (производственного процесса) [4].

Анализ, проведенный на участке механической обработки, показал, что 95 % всех выявляемых критических дефектов возникает на предыдущих участках и обусловлен не только спецификой мелкосерийного наукоемкого керамического производства, но и мотивацией сотрудников, работающих на предшествующих технологических стадиях, скрыть дефекты. Ситуацию усложняют многооперационность и длительность технологического процесса, благодаря чему дефекты, заложенные на предшествующих стадиях, выявляются только спустя продолжительное время на операции механической обработки. При этом весь период времени до выявления дефекта на предшествующих стадиях продолжали выпускать полуфабрикаты, в которых были заложены дефекты. В результате после выявления критического дефекта на стадии механической обработки приходилось браковать полуфабрикаты всех предыдущих стадий, что увеличивало потери от брака.

Рассмотрим наглядный пример инерции мышления. Самыми многочисленными изделиями, формуемыми методом шликерного литья, являются малогабаритные керамические тигли. В работу их запускают серией. Формование проводят при помощи формовочного комплекта (рис. 1). Для уменьшения расходов на изготовление формы было решено изготовить сердечник (поз. *5*, см. рис. 1) для формирования внутреннего контура заготовки и модель для формирования ее наружного контура с использованием одной центрирующей подвески (поз. *1*). Для этого сердечник и модель были выполнены с возможностью крепления на подвеске через резьбовое соединение, при этом для удобства их установки в съемных деталях выполнены технологические отверстия под инструмент, которые после установки замазывали. С одной стороны, это решение позволило сэкономить на изготовлении оснастки. Однако

* Продолжение. Части 1 и 2 опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» соответственно в № 11 и 12 за 2017 г.

✉
А. В. Беляков
E-mail: av_bel@bk.ru

выявился один негативный факт. В процессе работы замазка разрушалась и при невнимательности работника на сердечнике образовывалось отверстие, которое при формовании заполнялось шликером. В дальнейшем при отверждении заготовки и извлечении сердечника происходило вырывание материала из тела заготовки (рис. 2). При этом подсчитано, что ущерб от брака многократно превышал эффект от полученной экономии при изготовлении оснастки.

Важно понять, что основная цель «бережливого производства» — ускорение технологического цикла, т. е. ускорение потока создания ценности [3], а основным методом ускорения является борьба с потерями [5], даже за счет отказа от экономии на отдельных операциях и унификации оснастки и инструментов. Возникновение дефектов, которые на последующих стадиях приводят к критическим дефектам, увеличивает потери на производстве из-за необходимости затрат времени на изготовление новых заготовок. Принципиальная технологическая схема изготовления изделий радиотехнического назначения на основе литийалюмосиликатного (LAS) стекла показана на рис. 3.

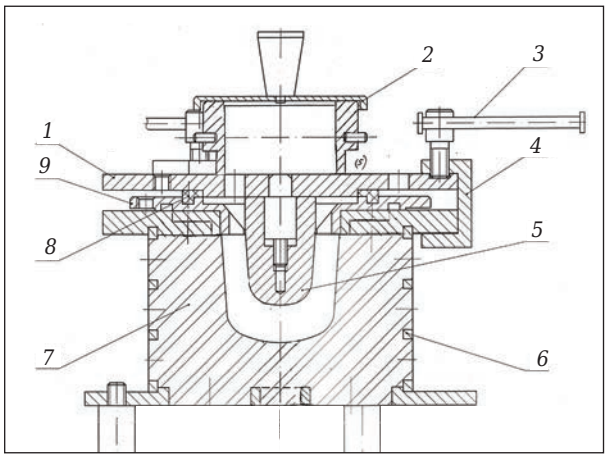

Рис. 1. Схема формовочного комплекта в сборе: *1* — подвеска; *2* — крышка; *3* — винт; *4* — скоба; *5* — сердечник; *6* — форма; *7* — гипс; *8*, *9* — кольцо

Рис. 2. Выявленный критический дефект в тигле после обжига

Критические дефекты, выявленные на операциях механической обработки, ранжированы по мере увеличения их количества на обусловленные: нарушением работы обрабатывающего станка; включениями в материале заготовки; сколами на торце обрабатываемой детали, ее разнотонностью; дефектами, обусловленными ошибочными действиями операторов; неравноплотностью материала; несоответствием требуемой геометрии заготовки; нехваткой высоты заготовки; раковинами и их скоплениями; трещинами. На основе собранной статистики по критическим дефектам, выявляемым на всех технологических стадиях, была построена диаграмма Парето (рис. 4), которая наглядно выявила критические дефекты, на устранении которых необходимо сконцентрировать внимание для получения наибольшего экономического эффекта от уменьшения потерь. Из общего количества критических дефектов 74 % приходится на два типа: трещины и раковины. На операциях механической обработки на них приходится 78 % критических дефектов. Различия в цифрах обусловлены тем, что существенную часть дефектов в виде трещин и открытых пор сложно выявить до начала механической обработки, удаляющей поверхностный слой, который может скрывать дефекты внутри заготовки.

Был проведен анализ причин возникновения критических дефектов по каждому их типу с использованием различных инструментов «бережливого производства» (тайминг, «5 почему», диаграмма Исикавы, стандартизация и т. д.).

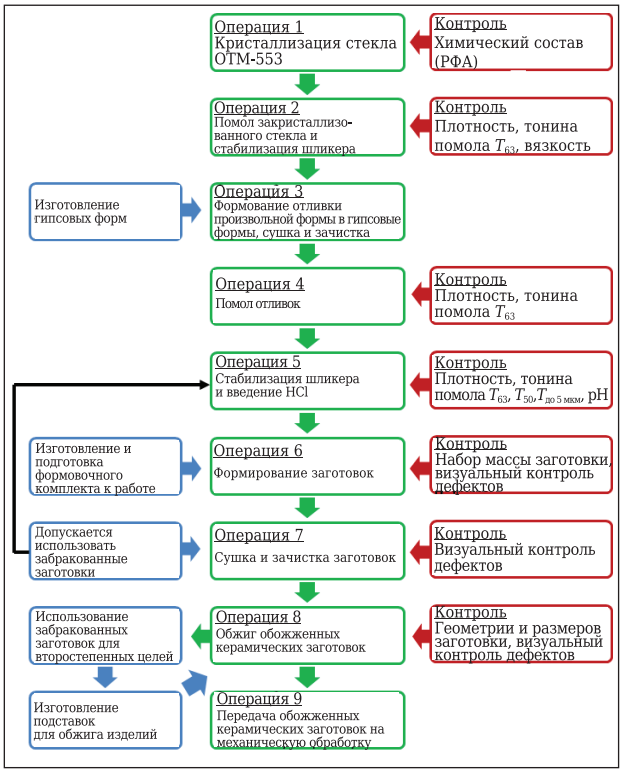

Рис. 3. Принципиальная технологическая схема изготовления изделий на основе литийалюмосиликатного стекла

Источники возможных причин возникновения дефектов можно разделить на шесть условных групп: внешняя среда для потока обрабатываемого материала на производстве; контроль технологии; используемые в производстве материалы; задействованные механизмы, оснастка и оборудование; методы выполнения операций и действий; квалификация и дисциплина работников [6]. Для каждого вида критического дефекта была построена диаграмма Исикавы, или диаграмма причинно-следственной связи. На рис. 5 показана диаграмма Исикавы, построенная по возможным источникам возникновения трещин в заготовках.

После определения наиболее актуальных направлений работы был проведен анализ уже собранной информации, а также подробно изучены фактические методики выполнения операций и действий путем наблюдения на производстве, просмотра видеозаписей и изучения паспорта изделий. Анализировали вклад человеческого фактора, построены диаграммы Парето по количеству выявленных критических дефектов для возможных их источников: работников, оснастки, мельниц для приготовления шликера, установок сушки и печей для обжига. Были проведены фиксирование и анализ трещин, их характера, зон расположения (рис. 6). На основании обобщенных данных были предложены возможные причины возникновения трещин.

1. Неравномерная усадка заготовки из-за разнотолщинности стенок, обусловленной неточностью совмещения элементов в комплекте для формования заготовок; отклонениями в геометрии элементов этого комплекта. При сборке комплекта для формования заготовок в варианте *Б* (рис. 7, *Б*) разнотолщинность стенок заготовки может достигать ±0,7 мм. В процессе набора

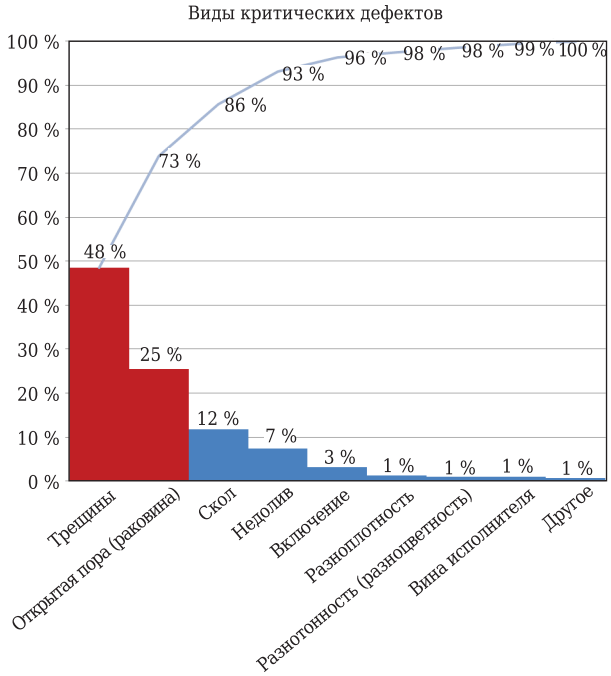

Рис. 4. Диаграмма Парето по выявленным видам критических дефектов

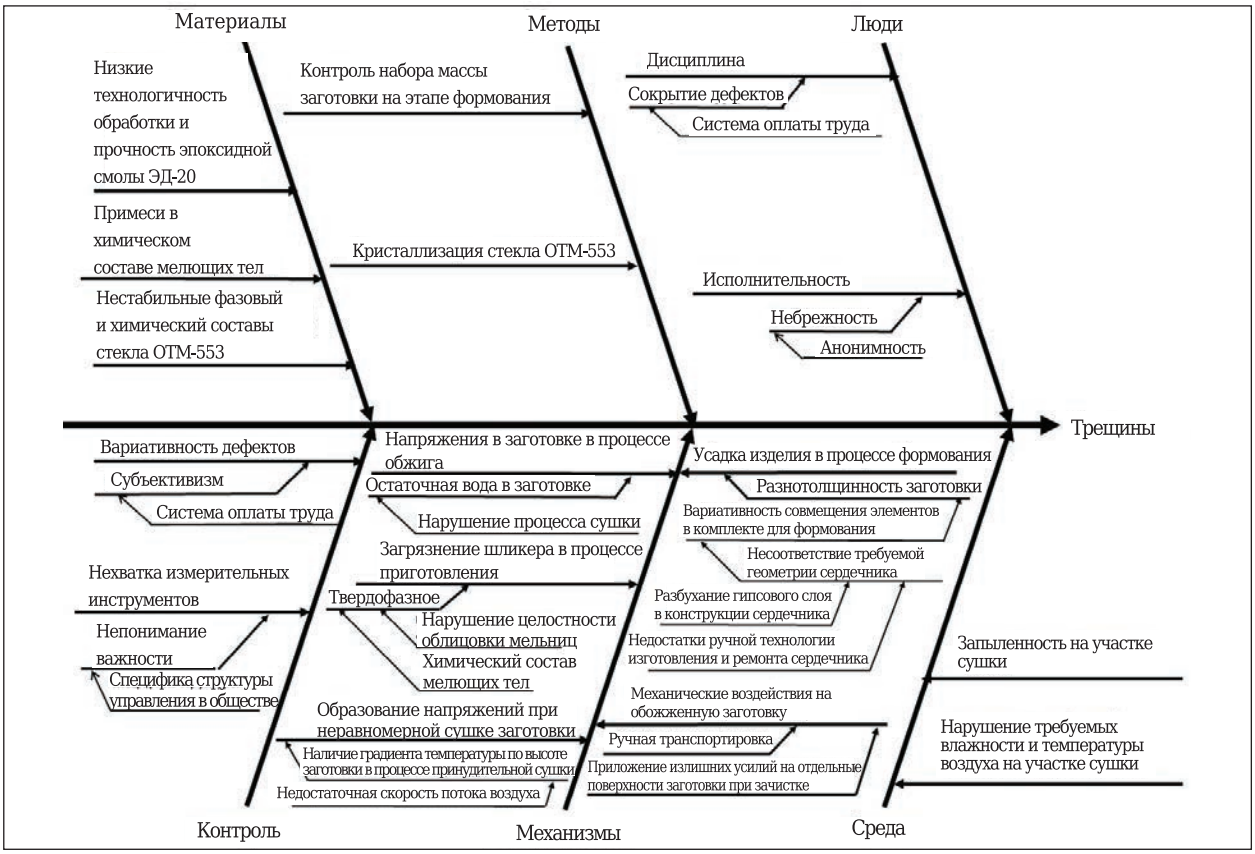

Рис. 5. Диаграмма Исикавы для критических дефектов трещины

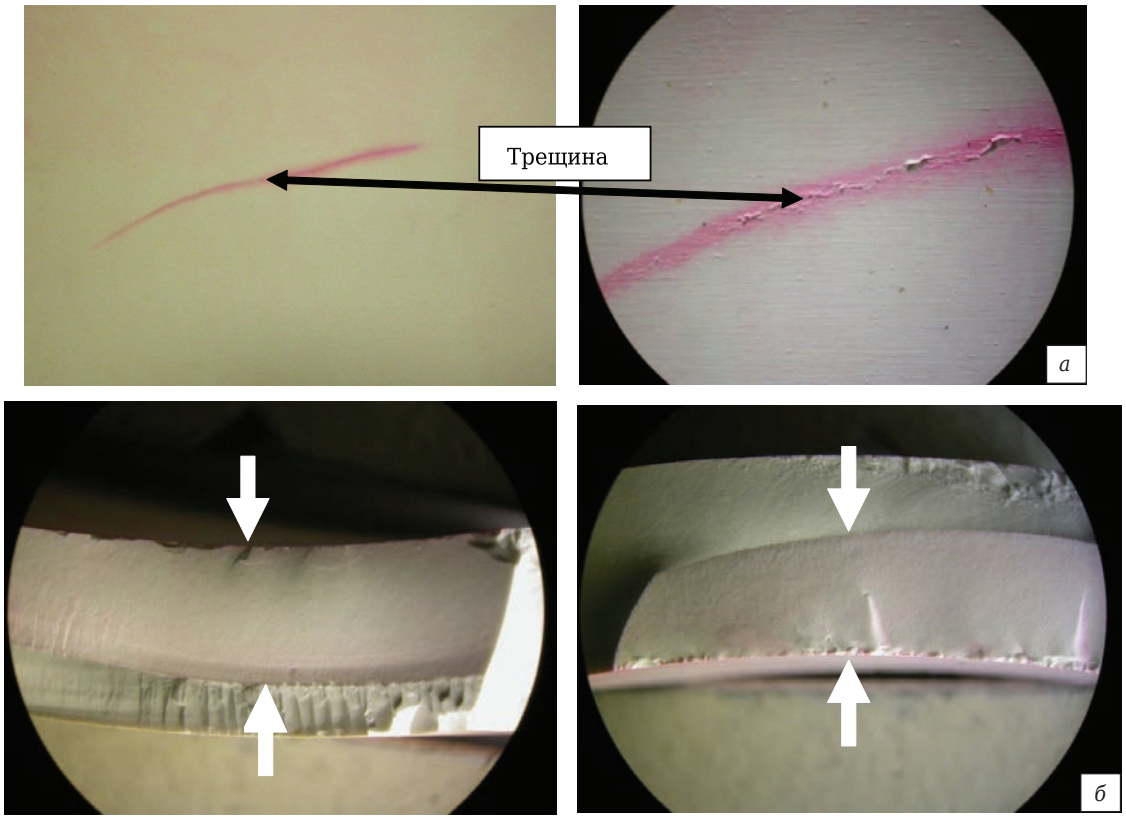

Рис. 6. Типичный вид трещин, образовавшихся после обжига заготовок: *а* — трещины перпендикулярно поверхности заготовки; *б* — трещины на сколе

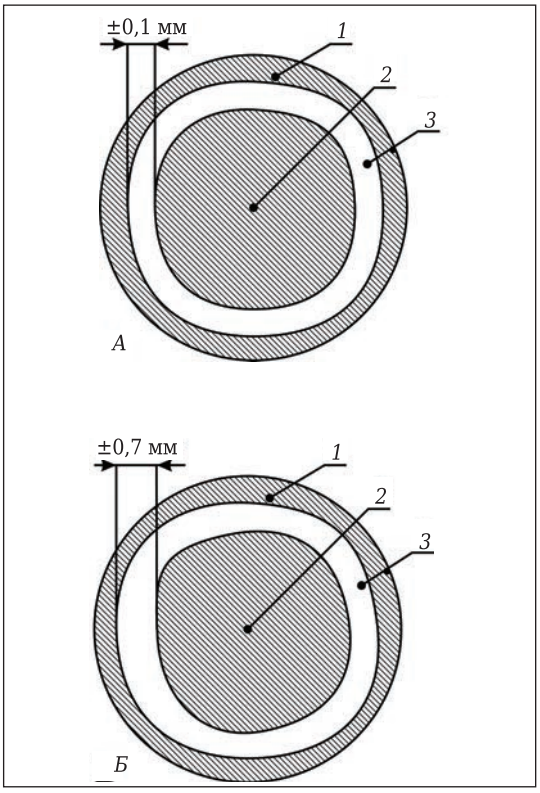

Рис. 7. Варианты ориентации сердечника и модели относительно друг друга: *А* — идеальная совместная ориентация, разнотолщинность ±0,1 мм; *Б* — нарушение совместной ориентации, разнотолщинность ±0,7 мм; *1* — гипсовая форма; *2* — сердечник; *3* — заготовка

массы при шликерном литье заготовки ее более тонкая часть корпуса быстрее заканчивает набор и начинает усадку по диаметру, чем более толстая, что создает дополнительные напряжения между этими частями. Используя инструмент «5 почему», выявили, что основной вклад в разнотолщинность вносят сердечники и модели комплекта для формования.

Принципиальная технологическая схема изготовления формообразующих поверхностей используется на предприятии уже более 40 лет и включает нанесение на металлический каркас сердечника слоя гипса, придание ему необходимого профиля, проточку гипса на глубину 15–20 мм, заливку слоя эпоксидной смолы ЭД-20 и окончательную ее доводку до необходимого профиля. Металлический каркас обеспечивает жесткость конструкции, применение гипса позволяет удешевить производство и уменьшить толщину слоя эпоксидной смолы, нанесение которой дороже и менее технологично. Учитывая достаточно низкую технологичность механической обработки эпоксидной смолы, связанную с тем, что при обработке резцом часто образуются раковины и сколы, получить слой с точно заданными геометрическими размерами достаточно сложно. Ситуацию усугубляет и то, что в слой гипса в процессе эксплуатации рано или поздно проникает вода, содержащаяся в шликере, что приводит к разбуханию гипса и, как правило, к

изменению геометрии сердечника либо к образованию на нем трещин (см. рис. 7).

Представляется целесообразной разработка нового материала для изготовления сердечников. Этот материал должен обладать технологичностью при заполнении объемных изделий, не требовать термообработки, позволять проводить точную обработку на станке, не реагировать с абразивным шликером, не вносить в тело заготовки посторонних включений, иметь необходимую прочность и т. д. Решение этой задачи позволит уменьшить количество дефектов, закладываемых на операции формования.

2. Неравномерная усадка заготовки из-за локальных изменений скорости набора массы в связи с различной впитывающей способностью гипса в комплекте для формования. Выражается в двух крайних отклонениях. После излишней сушки формы гипсовый слой слишком быстро впитывает воду, что нарушает равномерность набора массы в заготовке. В приповерхностных слоях заготовки начинается быстрая усадка, что приводит к возникновению в заготовке напряжений, которые могут вызывать образование трещин.

Загрязнение рабочей поверхности гипсовой формы смазкой (в нашем случае вазелином), возникающее в процессе изготовления гипсовой формы из-за смазки рабочей поверхности модели, приводит к образованию локальных участков, не впитывающих воду из шликера, и последующим очаговым нарушениям набора массы заготовки, что препятствует формированию равноплотной заготовки.

3. Создание локальных напряжений на внутренней поверхности заготовки во время извлечения сердечника, формирующего внутреннюю полость, из-за его прилипания к заготовке. Такая ситуация возникает, когда на поверхность сердечника наносится недостаточно равномерный разделительный слой смазки. В зонах нарушения нанесенного покрытия материал заготовки прилипает к сердечнику. Операция выполняется ручным способом и контролируется исключительно самим рабочим.

4. Образование трещин после соударения сердечника и заготовки во время его извлечения. Сердечник для крупногабаритных заготовок извлекают при помощи кран-балки. Если ее не разместить точно над сердечником и начать извлекать сердечник, то он может ударить по стенке заготовки и привести к появлению в ней трещин.

5. Механические воздействия на заготовку при ее ручной транспортировке между участками и при зачистке поверхности перед операцией обжига. После извлечения заготовок из формы их прочность невелика, а масса может достигать 60 кг. Для их перемещения используют ручные носилки и двух рабочих. Зачистку перед отправкой заготовки на обжиг проводят на участке принудительной сушки. Эта операция повышает запыленность помещения, ухудшает условия труда, приводит к нестабильной работе сушильных установок и ускоренному выходу из строя вентиляторов. Для устранения всех негативных последствий, связанных с ручной транспортировкой и зачисткой заготовки, практичнее разработать транспортную систему, которая позволит одному рабочему перемещать заготовку между операциями без необходимости перемещения ее вручную. И подготовить специализированное рабочее место для проведения зачистки с достаточным освещением, хорошей вентиляцией и механизмом для вращения заготовки для повышения качества обработки и ускорения операции.

6. Наличие градиента температуры по высоте заготовки в процессе принудительной сушки. Исследования показали, что в процессе работы сушильной установки внутренняя поверхность заготовки нагревается неравномерно (рис. 8), а в ее верхней части возникает воздушная пробка, которая нарушает режим сушки. Это создает до-

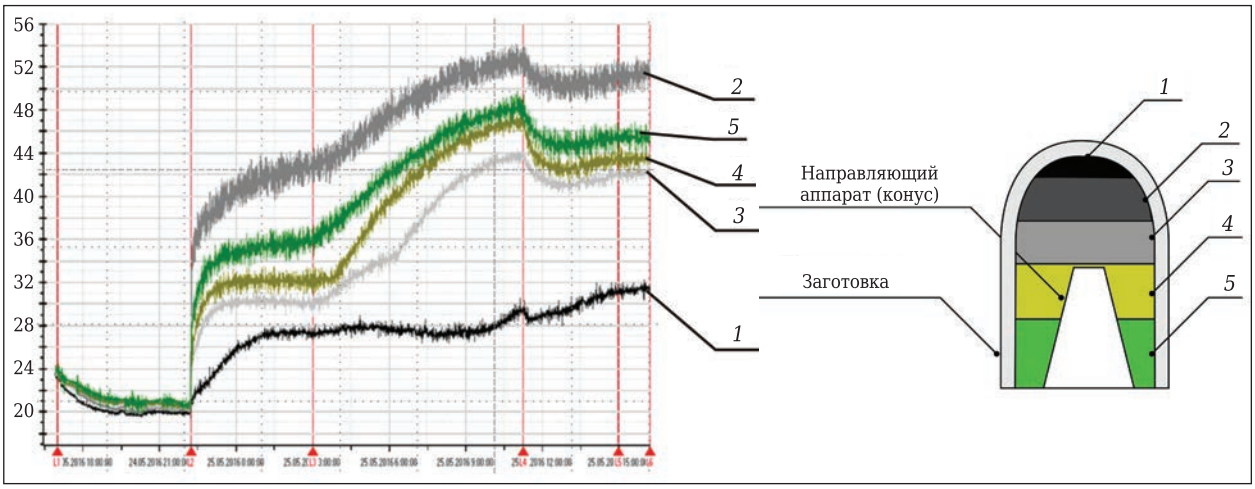

Рис. 8. Режим работы новой установки для сушки и зоны крепления термопар

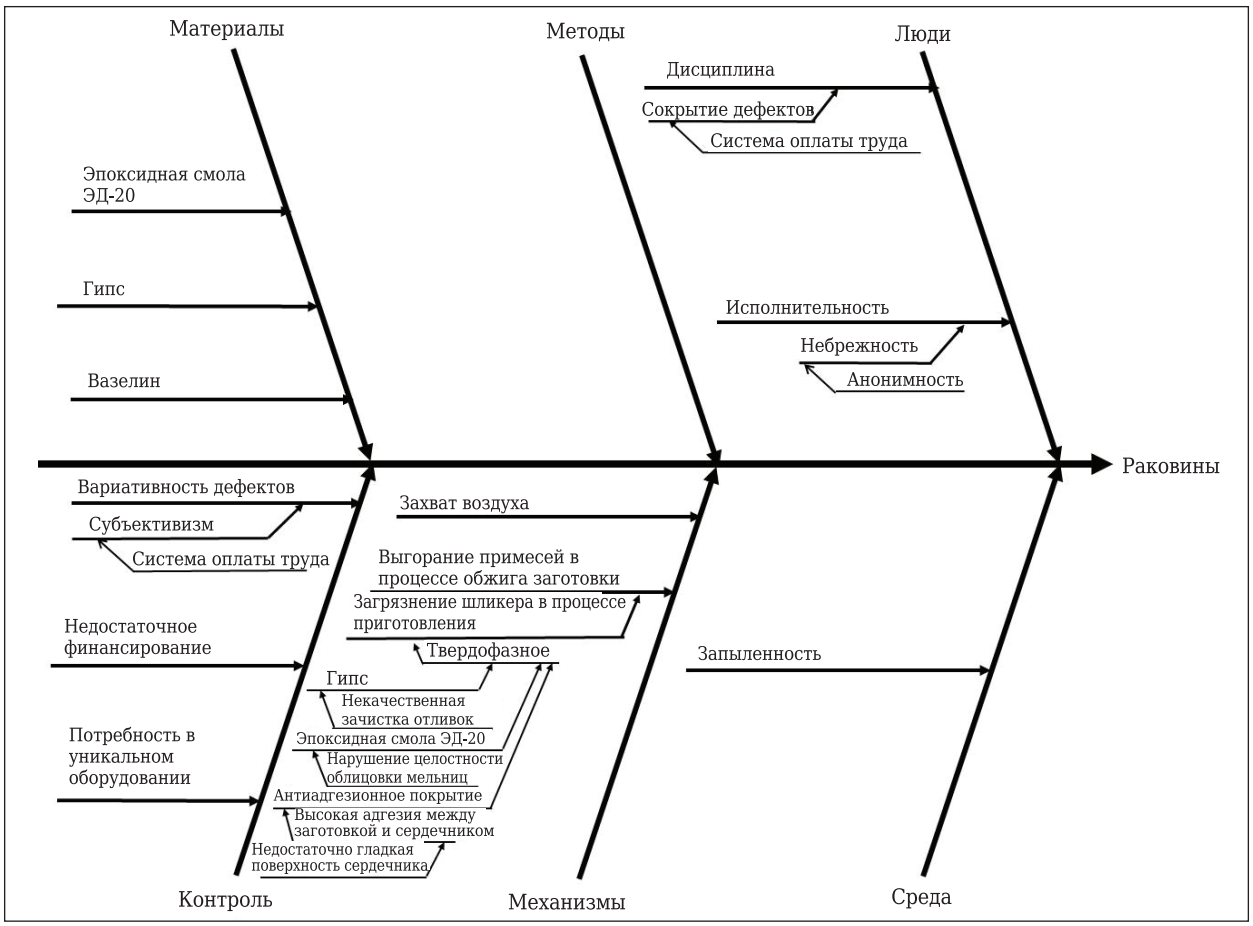

Рис. 9. Диаграмма Исикавы для критических дефектов раковины

полнительные напряжения в заготовке и может привести к тому, что на следующую операцию (обжиг) может быть отправлена недосушенная заготовка. Для устранения этих недостатков необходимо увеличить скорость потока воздуха в сушильной установке и максимально приблизить сопло направляющего конуса к носку заготовки, что, в свою очередь, потребует изменить метод помещения крупногабаритных заготовок на сушильную установку, а также их конструкцию и производительность.

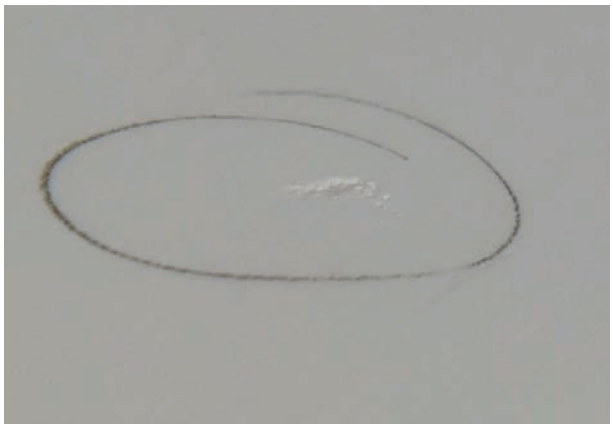

Рис. 10. Типичный вид скопления пор, образовавшихся после обжига заготовок

Проведенный анализ причин возникновения критических дефектов (рис. 9) в виде отдельных пор или их скоплений (рис. 10) позволил выявить несколько основных источников их образования.

1. Захват воздуха шликером на стадии его приготовления. Это длительная двухстадийная операция, включающая помол и стабилизацию. Воздух в шликер может попадать при его помоле, стабилизации и переливании. Воздух может попадать в шликер вместе с водой, используемой при приготовлении шликера.

2. Захват воздуха на операциях прохождения шликера через сито и формования. После завершения операции приготовления шликер пропускают через сито для отделения крупных включений и заливают в комплект для формования. На этих двух операциях в шликер тоже может попадать воздух.

3. Загрязнение шликера при помоле и смешивании в шаровых мельницах. Выявлены два основных источника загрязнения шликера. Первый источник — мелющие тела и футеровка из корундовой керамики, в которых количество примесей может быть до 6 % и с разным химическим составом. Дополнительно в шликер могут попадать примеси железа, если в процессе приготовления шликера плитка керамической футеровки отклеится от корпуса барабана мель-

ницы и мелющие тела начнут отбивать частицы металла от стен мельницы. При этом в шликер кроме железа попадает эпоксидная смола (ЭД-20), при помощи которой приклеивают футеровочные плитки к стенам. Эти примеси сильно влияют на количество критических дефектов. Чаще всего факт загрязнения шликера этими примесями проявляется только после выявления критических дефектов на последующих операциях. В связи с тем что используемые мельницы нестандартные, футеровку на них изготавливают собственными силами. Плитки размерами 100×100×10 мм изготавливают из материала на основе алюмооксидной керамики. Необходимо провести исследования качества используемых расходных материалов и по возможности устранить попадание нежелательных примесей.

4. Выгорание примесей в процессе обжига заготовок с образованием полостей и раковин. В процессе анализа было выявлено несколько основных источников выгорающих загрязнений, попадающих в шликер. Это остатки неочищенного гипса с отливок, полученных на операции 3 (см. рис. 3), частицы антиадгезионного покрытия (смазки), используемого в комплекте для формования, пыль и грязь, попавшие внутрь собранного комплекта для формования, мелкие осколки комплекта для формования (гипс, эпоксидная смола и краска). До операции обжига их полное выявление в необожженной заготовке затруднительно. Обычно влияние этих примесей выявляется в процессе технического контроля после обжига либо уже на стадии механической обработки.

Проведенная работа показала, что даже в давно разработанной и отработанной технологии производства керамических изделий есть возможности для дальнейшего ее улучшения. Начинать надо с открытого признания существующих технологических проблем и готовности всего персонала (руководителей, технологов, специалистов по обслуживанию оборудования, мастеров и работников) совместно решать выявленные проблемы. Необходимо обеспечить оперативное получение объективной информации, проведение всестороннего ее анализа с привлечением специалистов различных направлений, а также выработку и реализацию решений по устранению проблем. Все возможные решения можно разделить на четыре группы: «быстро и недорого», «долго и недорого», «быстро и дорого» и «долго и дорого» в «Петле рациональности выбора улучшений» (рис. 11). Оптимально начинать с первой группы («быстро и недорого») и по мере завершения работ на этом этапе переходить к следующим группам. Выбирать среди них следует те, которые влияют сразу на несколько типов критических дефектов. Правильный выбор направления приложения усилий при улучшении технологии позволит в кратчайшие сроки и с минимальным расходом достичь максимальных результатов.

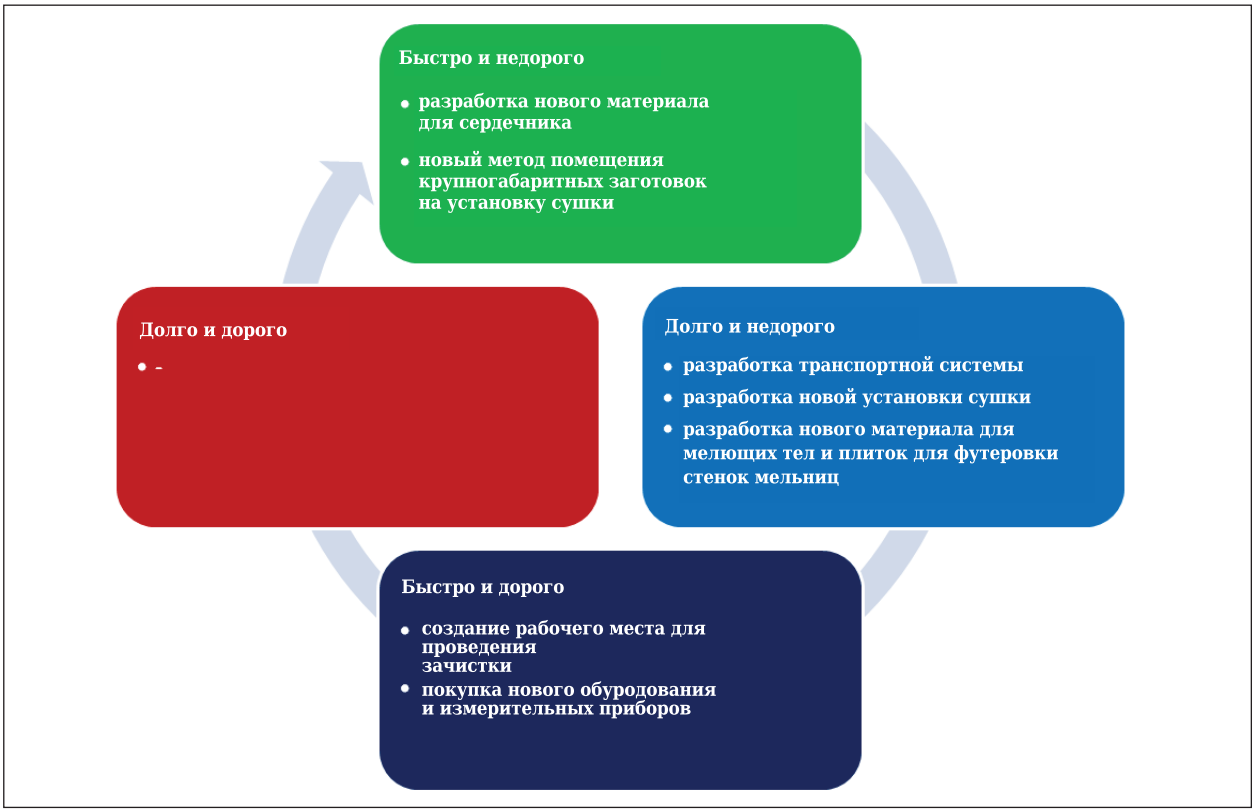

Рис. 11. «Петля рациональности выбора улучшений»

Соответственно, все предложенные решения можно распределить по группам. Главное, четко определить критерии «быстро», «медленно», «недорого» и «дорого». Например, все улучшения, которые можно реализовать менее чем за один квартал, следует считать «быстрыми». Соответственно, решения, требующие для реализации больше квартала, считать «долгими». Аналогично следует подойти к выбору критериев «недорого» и «дорого». Все решения, на реализацию которых нужно потратить менее 1 млн руб., можно считать «недорогими», а для тех, на реализацию которых нужно потратить более 1 млн руб., считать «дорогими».

В группу «быстро и недорого» попадают: разработка нового материала для сердечника, новый метод помещения крупногабаритных заготовок на установку; в группу «долго и недорого»: разработка транспортной системы, разработка новой сушильной установки, разработка нового материала для мелющих тел и плиток для футеровки стен мельниц. В группу «быстро и дорого» можно включить: создание рабочего места для проведения зачистки. Решения, попадающие в группу «долго и дорого», чаще всего реализовывать нецелесообразно. Быстрее и выгоднее повторить анализ существующих проблем, разработать пути улучшения, распределить их по группам и снова начать с группы «быстро и недорого», т. е. снова использовать наиболее быстрые и экономически целесообразные улучшения. Этот процесс, по сути, бесконечен, но для сохранения высокой экономической эффективности и оперативности будет повышать требования к профессионализму и слаженности работы руководства, специалистов и рабочих.

Наиболее перспективными направлениями могут служить работы по изменению технологии: изготовление сердечника, входящего в комплект для формования, разработка новой сушильной установки, создание специализированного рабочего места для зачистки заготовки перед операцией обжига, минимизация образования дефектов при транспортировке заготовок. После успешного завершения первого цикла изменений и уменьшения критических дефектов потребуется повторно провести анализ, построить новую диаграмму Парето по количеству выявляемых критических дефектов для выбора наиболее рациональных направлений дальнейшей работы [7]. И данный цикл следует повторять постоянно. При этом неизбежно будут уменьшаться время технологического цикла и влияние человеческого фактора на качество [8]. Это повысит прибыль компании и создаст благоприятные условия для выделения средств и ресурсов на дальнейшие улучшения, а также позволит перейти от улучшений из групп «быстро и недорого» и «долго и недорого» к группе «быстро и дорого».

Потребность в ускорении производства для повышения конкурентоспособности продукции и прибыли компании диктуется рынком и ставит перед технологами серьезные задачи. Требуется организовывать и проводить большую совместную работу технологов с разных этапов производства, обслуживающих специалистов и даже рядовых работников. Ускорение производственных процессов и повышение их плавности уменьшает время на реакцию (для анализа ситуации и принятия решений) при изменении качества продукции, материалов, оборудования или оснастки. Требования к качеству выпускаемой продукции становятся все более жесткими; уменьшается время для подготовки к производству новых продуктов или улучшению уже выпускаемых, что заставляет изменить подходы к взаимодействию с поставщиками, конструкторами и ОТК.

Проведенный анализ технологии с помощью инструментов «бережливого производства» показал, что существенный вклад в появление брака вносят не только чисто технологические стадии (подготовка формовочной массы, формование, сушка, обжиг), но и вспомогательные операции (состояние гипсовой формы для литья, извлечение полуфабриката из гипсовой формы, транспортировка полуфабриката от стадии формования на стадию сушки и после этого на стадию обжига). Технологи обычно уделяют основное внимание контролю параметров технологических стадий, а не вспомогательных. Системный подход с позиций «бережливого производства» позволил понять, что вспомогательные операции могут вносить значительный вклад в появление брака. Важную роль играет то, что технологи привыкают к контролю лишь определенных параметров, считают себя достаточно компетентными и не любят прислушиваться к советам и просьбам тех технологов, которые отвечают за другие стадии технологического процесса. Психологически технологам, ответственным за ту или иную технологическую стадию, легче выполнять рекомендации работников отдела «бережливого производства», ссылающихся на результаты формального анализа. Работникам отдела «бережливого производства» значительно проще организовать эффективное взаимодействие всех участвующих в процессе производства работников, прежде всего технологов, по выявлению и уменьшению брака.

В то же время применение подходов «бережливого производства» позволило понять, что для устранения брака важнейшую роль играет человеческий фактор. Для устранения брака необходимо использовать не только совершенствование собственно технологических параметров, но и организацию контроля вспомогательных операций и их совершенствование. Необходимо оптимизировать оплату труда так, чтобы работ-

ники и основных, и вспомогательных стадий технологического процесса были заинтересованы в уменьшении брака готовой продукции, который выявляется на конечных стадиях производства изделий.

У предлагаемого подхода к сокращению брака есть и другие преимущества. С ростом авторитета в глазах руководства от позитивных экономических эффектов увеличиваются возможности модернизации оборудования и измерительных приборов. Усиление взаимодействия всех участвующих в процессе производства работников повышает стабильность технологических процессов и дает больше оперативных и достоверных данных, которые упрощают анализ и принятие верных решений. Встраивание параметров качества в процесс производства позволяет уменьшить количество дефектов, упрощает их обнаружение и анализ причин их возникновения.

Таким образом, роль технолога и проводимой им научно-технологической работы в улучшении финансовых результатов его компании возрастает, повышая его востребованность и ценность в глазах руководства.

Библиографический список

1. ***Харитонов, Д. В.*** Применение инструментов «бережливого производства» для оптимизации выпуска мелких серий изделий из стеклокерамики. 1. Общие сведения о принципах «бережливого производства» / *Д. В. Харитонов, А. В. Беляков, Д. А. Анашкин* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — С. 27–30.

2. ***Харитонов, Д. В.*** Применение инструментов «бережливого производства» для оптимизации выпуска мелких серий изделий из стеклокерамики. Часть 2. Поиск узких мест устоявшегося технологического процесса / *Д. В. Харитонов, А. В. Беляков, Д. А. Анашкин* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 12. — С. 20–26.

3. ***Оно, Т.*** Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / *Т. Оно, В. Е. Болтрукевич ;* под ред. В. Е. Болтрукевича. — М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2012. — 208 с.

Ohno, T. The Toyota production system: beyond large-scale production / *T. Ohno.* — Portland, Oregon : Productivity Press, 1988. — 143 p.

4. ***Серегин В. Э.*** Экономический анализ процедур управления затратами на качество продукции промышленного предприятия : монография / *В. Э. Серегин, Е. Б. Герасимова* ; под ред. Б. И. Герасимова. — Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2009. — 79 с.

5. ***Вялов, А. В.*** Бережливое производство : уч. пособие / *А. В. Вялов.* — Комсомольск-на-Амуре : КнАГТУ, 2014. — 100 с.

6. ***Исикава, К.*** Японские методы управления качеством / *К. Исикава.* — М. : Экономика, 1988. — 199 с.

Ishikawa, K. What is total quality control? The Japanese way / *K. Ishikawa.* — New York : Prentice Hall, 1985. — 215 p.

7. ***Блауг, М.*** 100 Великих экономистов до Кейнса / *М. Блауг.* — СПб. : Экономическая школа, 2005. — 352 с.

Blaug, M. Great economists before keynes: an introduction to the lives and work of one hundred great economists of the past / *M. Blaug.* — Brighton (Sussex) : Wheatsheaf books, 1986. — 286 p.

8. ***Детмер, У.*** Производство с невероятной скоростью: улучшение финансовых результатов предприятия / *У. Детмер, Э. Шрагенхайм.* — М. : Альпина Паблишерз, 2009. — 330 с.

Dettmer, H. W. Manufacturing at warp speed: optimizing supply chain financial performance / *H. W. Dettmer, E. Schragenheim.* — Boca Raton : CRC Press, 2000. — 376 p. ■

Получено 01.03.18

© Д. В. Харитонов, А. В. Беляков, Д. А. Анашкин, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ