



The comparison of the results of the temperature regimes of the heating furnace with pacing backstone with experimental data, received in terms of operating production at working of furnace with varied capacity is carried out.

*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,
М. Л. ГЕРМАН, П. С. ГРИНЧУК, ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
С. М. КАБИШОВ, БНТУ, С. В. КОРНЕЕВ, ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*

УДК 621.783.321.3

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМ ПОДОМ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Введение

В процессе функционирования современных металлургических предприятий в зависимости от требований рынка изменяются сортамент и марочный состав производимой продукции. Это приводит к необходимости обновления действующего оборудования, реконструкции и замене морально устаревших и физически изношенных узлов и деталей. Изменение конструктивных элементов и сортамента, в свою очередь, требует разработки новых и корректировки существующих технологических режимов.

Существуют два варианта решения данной проблемы: проведение серии промышленных экспериментов с целью определения оптимальных технологических параметров либо применение математического аппарата, позволяющего достоверно описать исследуемый процесс.

Экспериментальные исследования в условиях действующего производства требуют значительных материальных затрат, что не позволяет создать базу данных, достаточную для выявления закономерностей процесса.

При математическом моделировании технологических процессов также возникает ряд проблем, связанных с необходимостью учета большого числа факторов. Это вынуждает исследователей делать ряд допущений и упрощений. Как следствие, теоретическое решение также требует корректировки по результатам промышленных экспериментов для учета конструктивных и технологических особенностей конкретного агрегата. Но адекватный математический инструмент позволяет прогнозировать результаты и выявлять закономерности процесса, определять оптимальные режимы работы оборудования при значительно меньших материальных и временных затратах.

Наиболее перспективным направлением теоретических исследований нагревательных печей про-

катного производства является создание математических моделей сопряженного (внутреннего и внешнего) теплообмена. По сравнению с другими методиками такая модель обладает рядом достоинств: она позволяет учитывать геометрические параметры рабочего пространства, теплофизические свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций, месторасположение газогорелочных устройств, нелинейность теплофизических свойств металла, шаг раскладки заготовок, влияние на процесс нагрева металла растущего слоя окалины и т.д.

В работах [1, 2] авторами изложены основные положения модели сопряженного теплообмена применительно к нагревательной печи с шагающим подом. Данная статья посвящена оценке адекватности указанной модели на основе сравнения расчетных данных с результатами экспериментов, проведенных в условиях действующего производства на нагревательной печи стана 320 РУП «Белорусский металлургический завод».

Сопоставление экспериментальных данных и результатов математического моделирования

Прежде чем приступить к анализу результатов, необходимо отметить, что любое компьютерное моделирование проводится с определенной погрешностью. В рассматриваемой проблеме указанная погрешность имеет три источника. Во-первых, неточность расчета температуры обусловлена приближенным характером модели. В нашем случае оценка показывает, что этот фактор приводит к погрешности в 5% [1, 2]. Вторым источником погрешности служит несовершенство численной схемы. В данном случае погрешность численного счета составляет не более 1%. Наиболее существенным, на наш взгляд, источником ошибки при проведении компьютерного моделирования является отсутствие *точных* данных о физических (в

нашем случае главным образом теплофизических) свойствах всех материалов, участвующих в процессе, во всем диапазоне рабочих температур. Этот фактор может обуславливать погрешность расчета вплоть до 10%. Эта проблема является принципиальной и ее рассмотрение заслуживает отдельного исследования. Таким образом, указанные факторы могут приводить к абсолютной погрешности расчета температуры заготовки в несколько десятков градусов Кельвина.

Для проведения корректных расчетов был задан ряд параметров рассматриваемой системы с учетом их зависимости от температуры. Прежде всего это теплофизические свойства нагреваемого металла, окалины, образующейся на поверхности заготовки и оказывающей значительное влияние на динамику нагрева стали, футеровочных и теплоизоляционных материалов и т.д. Эти свойства были взяты из справочной литературы [3–6].

Результаты расчета сравнивали с экспериментальными данными по термометрированию заготовок в процессе их нагрева в печи стана 320 РУП «Белорусский металлургический завод». Следует отметить особенность конструкции исследуемого агрегата, которая учитывалась при проведении расчетов: под нагревательной печи стана 320 является комбинированным (рис. 1). Для увеличения симметричности нагрева в методической зоне заготовки нагреваются на шагающих балках: сверху – за счет теплоты уходящих газов и излучения ограждающих конструкций, снизу – за счет работы длиннофакельных горелок. В сварочных и томильной зонах организован односторонний нагрев металла на шагающем поде. Источником теплоты являются сводовые плоскопламенные горелки. С точки зрения модели такое различие не является принципиальным, но может привести к некоторой погрешности расчета на начальной стадии нагрева. Для учета различий конструкции пода методической и остальных отапливаемых зон эффективная толщина пода, закла-

дываемая в модель, была уменьшена пропорционально той длине, которую занимает методическая зона во всей печи.

Сопоставление результатов и экспериментальных данных построено следующим образом. Первоначально для каждого из трех рассматриваемых экспериментов дано описание всех параметров программы, которые соответствуют условиям эксперимента. Затем заложен экспериментально измеренный профиль температуры печных газов и по этому профилю произведен расчет основных характеристик процесса нагрева. Такой подход обусловлен технологическими особенностями работы нагревательной печи стана 320, согласно которым технология бездефектного нагрева требует поддержания заданного профиля температуры печных газов по всей длине печи. Сопоставление проведено по тем характеристикам процесса нагрева, информация о которых имеется в экспериментальных данных.

Первый из экспериментов был проведен на РУП «БМЗ» на печи стана 320 до начала ее реконструкции (март 2004 г.). Производительность печи по нагреваемому металлу составляла 52,2 т/ч.

Для данного эксперимента параметры, заложенные перед началом вычислений в программу, были следующими. Свойства заготовки: материал – сталь Ст3; квадратное сечение размером 125x125 мм; длина заготовки – 11,8 м; начальная температура металла – 110 °С; конечная – 1200 °С; скорость перемещения заготовки – 3,285 мм/с; расстояние между осями заготовок – 200 мм; температура подогрева смеси – 390 °С; температура окружающей среды – 20 °С. Кроме того, в качестве исходных данных были заданы размеры печи: высота – 1,57 м; ширина – 12,5 м; длины зон (в порядке движения металла): 9,48, 6,68, 6,35, 6,7 м, а также теплота окисления окалины ($Q=5$ МДж/кг) и теплота сгорания газа (35,5 МДж/м³).

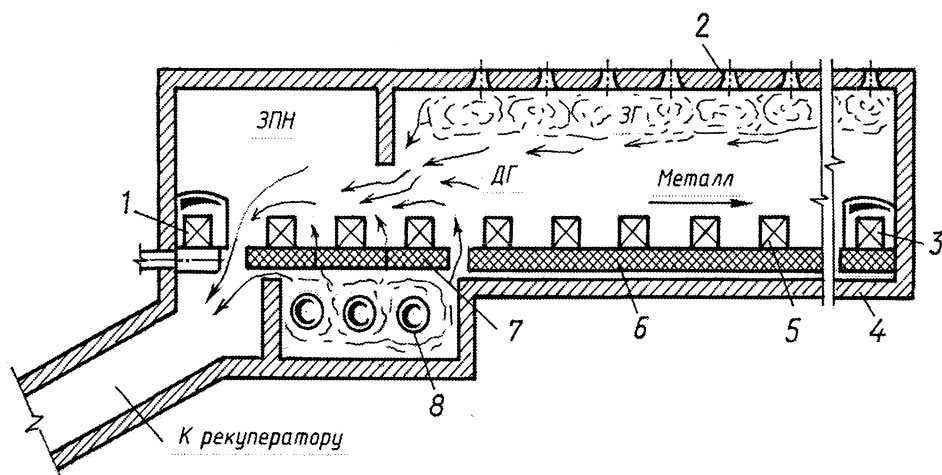


Рис. 1. Схема нагревательной печи стана 320 РУП «БМЗ»: 1 – боковой посад заготовок; 2 – сводовая плоскопламенная горелка; 3 – боковая выдача заготовок; 4 – обмуровка печи; 5 – нагреваемая заготовка; 6 – участок шагающего пода; 7 – шагающие балки; 8 – боковая длиннофакельная горелка; ЗПН – зона предварительного нагрева; ЗГ – зона горения; ДГ – дымовые газы

Результаты сопоставления проведенных вычислений и экспериментальных данных приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что в методической зоне интенсивность нагрева, предсказываемая моделированием, несколько меньше, чем измеренная экспериментально. Этот факт объясняется отличием конструкции пода в методической зоне (шагающие балки) от пода в других зонах, о чем было сказано ранее. Тем не менее, с учетом указанных выше погрешностей экспериментальных измерений и компьютерного моделирования можно констатировать хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными. Следует отметить и хорошее соответствие по такому параметру, как потребление газа. Согласно результатам расчета, потребление газа составило 2939,8 м³/ч, в то время как экспериментально измеренная величина 2942,82 м³/ч. Для такого показателя, как образование окалины, расчет дал величину 10,1 кг/т. В эксперименте эта величина не была зафиксирована.

Результаты расчета сопоставления расчетных и экспериментальных данных второго эксперимента, в процессе которого в печи нагревались заготовки из стали Ст.3сп. размерами 125x125x11800 мм (температура посяда - 190 °С; конечная - 1190 °С; производительность печи - 71,65 т/ч), приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что и в этом случае имеется хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными по температуре заготовки. Аналогичная ситуация наблюдается и с расходом газа. Согласно результатам расчета, потребление газа составило 3653,5 м³/ч, в то время как экспериментально измеренная величина равна 3655,04 м³/ч. Для такого показателя, как образование окалины, расчет дал величину 7,3 кг/т. Экспериментальная информация об образовании окалины отсутствует.

Последний из экспериментов (марка стали Ст.3сп., размеры 125x125x11800 мм; температура посяда - 120 °С; конечная - 1185 °С; производительность печи - 109,9 т/ч), с которым были сопоставлены результаты расчетов, проводили на реконструированной печи. Отметим, что

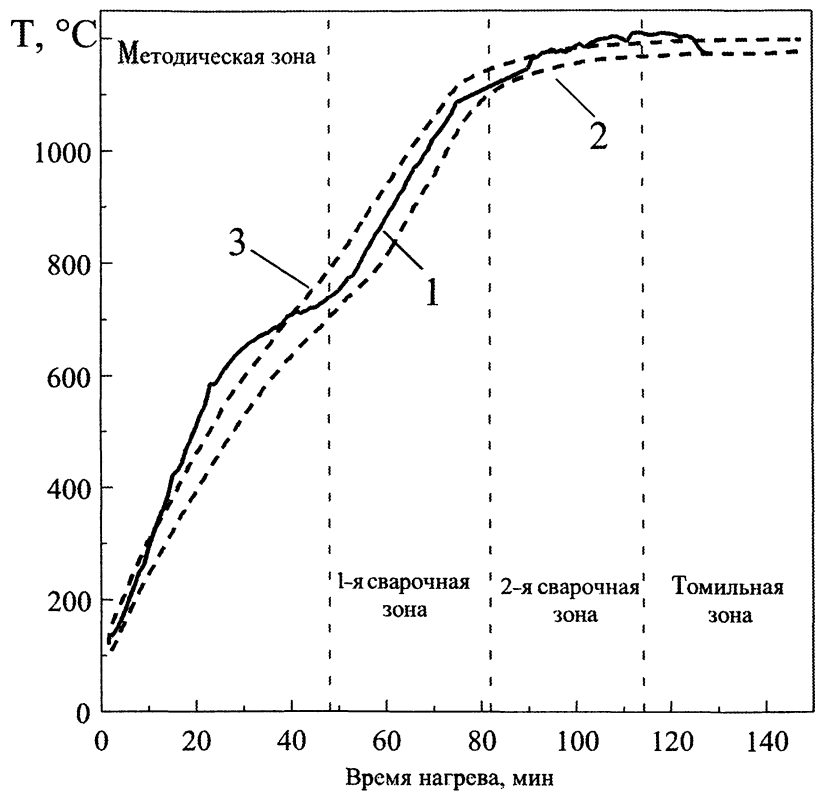


Рис. 2. Сопоставление расчета и экспериментальных данных (производительность печи 52,2 т/ч): 1 - экспериментально измеренное значение температуры в центре заготовки; 2, 3 - минимальная и максимальная температура в сечении заготовки по результатам компьютерного расчета

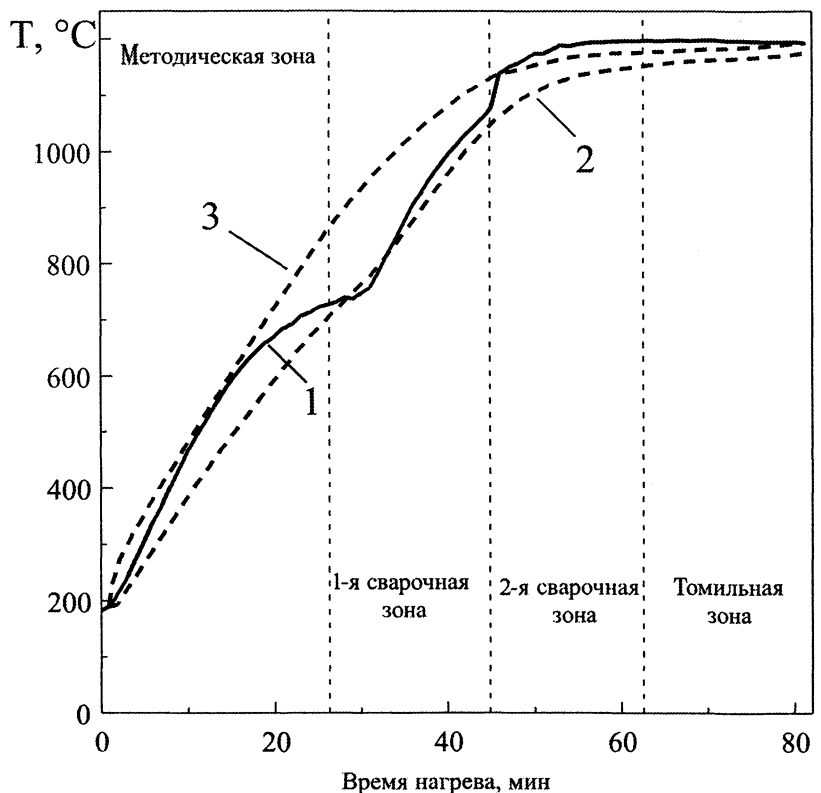


Рис. 3. Сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных для производительности печи 71,65 т/ч: 1 - экспериментально измеренное изменение температуры в центре заготовки; 2, 3 - минимальная и максимальная температура заготовки по результатам компьютерного расчета

в процессе реконструкции была обновлена футеровка, что улучшило герметичность печи (уменьшился подсос воздуха) и произведена замена горелок в сварочных зонах. Это было учтено при задании исходных данных.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных по приведенным выше параметрам третьего эксперимента приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что и в этом случае имеется хорошее согласование экспериментальных данных по температуре в различных точках заготовки с расчетными данными. Особо хотелось бы отметить неплохое соответствие такого параметра, как максимальный перепад температуры по сечению заготовки. Этот факт является, на наш взгляд, принципиальным, поскольку он определяет качество нагрева (отсутствие деформаций при нагреве).

Согласно результатам расчета, величина угара металла в данном случае составила 7,8 кг/т. В то же время экспериментально определенное количество окалины равно 7,78 кг/т.

В данном случае имеется возможность более детального сопоставления по расходам газа. В таблице представлены результаты такого сопоставления по зонам печи и по всей печи в целом.

Сопоставление эксперимента и компьютерного расчета по расходу газа по зонам печи производительностью 109,9 т/ч

| | Методическая зона | 1-я сварочная зона | 2-я сварочная зона | Томильная зона | Всего по печи |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------|
| Эксперимент, м ³ /ч | 1100 | 1200 | 900 | 404 | 3604 |
| Моделирование, м ³ /ч | 973,4 | 1296,3 | 997,1 | 343,2 | 3609,9 |
| Разность, м ³ /ч | -126,6 | 96,3 | 97,1 | -60,8 | 5,9 |
| Разность, % | -11,5 | 8,0 | 10,8 | -15,0 | 0,2 |

Различие рассчитанного и экспериментально измеренного распределения расхода газа по зонам печи также связано с конструкцией пода в методической зоне. Использование водоохлаждаемых балок в методической зоне нагревательной печи стана 320 не заложено в математическую модель. Это приводит к уменьшению расчетной величины расхода газа в методической зоне по сравнению с экспериментально измеренной приблизительно на 10%. Это различие вызывает приблизительно такое же относительное расхождение расходов газа (но уже с обратным знаком) в следующих зонах печи. Однако общий баланс по расходу газа модель учитывает правильно.

Таким образом, принимая во внимание все упрощения, использованные при построении модели, следует отметить достаточно хорошее соот-

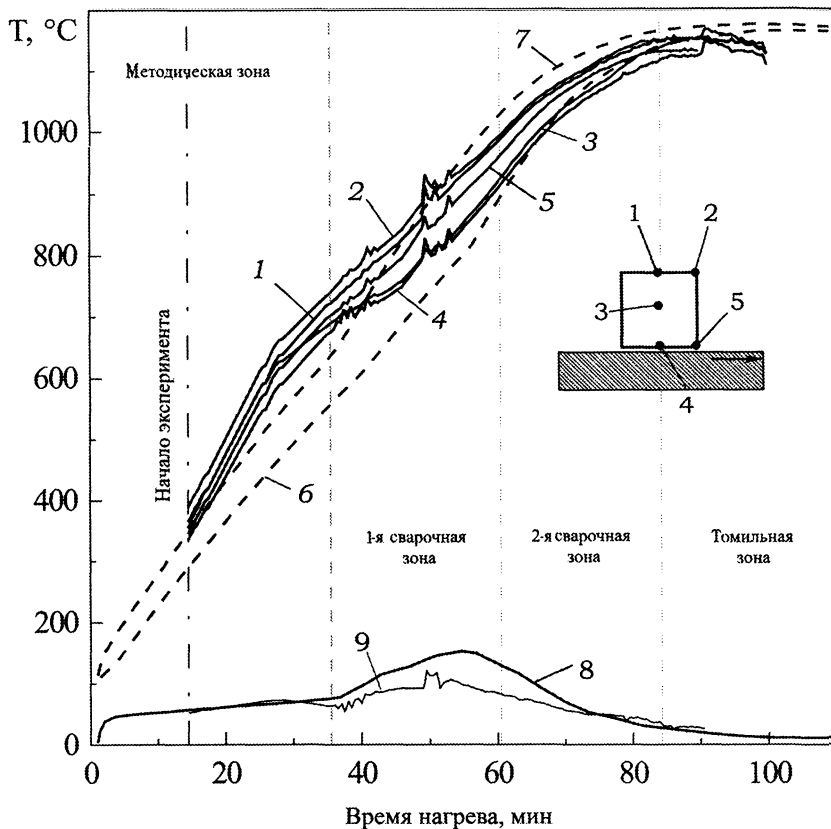


Рис. 4. Сопоставление данных третьего эксперимента и компьютерного моделирования: 1–5 – показания термопар (сплошные линии, схема зачеканивания термопар представлена на рисунке); 6, 7 – минимальная и максимальная температура заготовки по результатам компьютерного моделирования (штриховые линии); 8, 9 – максимальная разность температур в заготовке (8 – результат моделирования; 9 – экспериментально измеренная величина)

ветствие разработанной модели сопряженного нагрева стальных заготовок в печи с шагающим подом и реального поведения ключевых параметров работы печи.

Выводы

В данной статье проведено сопоставление результатов расчета температурных режимов нагревательной печи с шагающим подом с экспериментальными данными, полученными при проведении трех экспериментов при работе печи с различной производительностью. По всем характеристикам, информация о которых была представлена в экспериментальных данных, а именно по зависимости температуры заготовок от времени, расходу газа и образованию окалины, получено хорошее соответствие теории и эксперимента.

Данное обстоятельство позволяет с высокой степенью достоверности использовать результаты расчетов температурных режимов нагрева стальных заготовок в печи с шагающим подом, выполненные на основе разработанной компьютерной программы, с целью исследования и оптимизации технологии нагрева.

Литература

1. Тимошпольский В.И., Герман М.Л., Гринчук П.С., Ознобишин А.Н. Численное решение уравнения переноса излучения в поглощающей, излучающей и рассеивающей среде со сложной 3-D геометрией // ИФЖ. 2005. Т. 78, № 1. С. 138–147.

2. Тимошпольский В.И., Герман М.Л., Гринчук П.С., Андрианов Д.Н. Расчет характеристик переноса теплового излучения в рабочем пространстве кольцевой печи // ИФЖ. 2005. Т. 78, № 3. С. 3–14.

3. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, Ю.А.Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.

4. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.Б. Стеблов, И.А. Павлюченков. Мн.: Выш. шк., 1992.

5. Теплотехнический справочник / Под ред. С.Г. Герасимова. М.: Гос. энерг. изд-во, 1957.

6. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М., 1991.



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
— один из крупнейших информационных центров Беларуси
предлагает специалистам ознакомиться с новыми патентами
и полезными моделями по литью и металлургии.

ПОЛЕЗНАЯ МОДЕЛЬ 1792, МПК7 F 25B 17/00, F 28D 15/00. АБСОРБЦИОННАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЦЕХОВ

Патентообладатели: Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»; Белорусский национальный технический университет; Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси.

Полезная модель относится к криогенной технике и может быть использована при разработке холодильных машин, используемых преимущественно для охлаждения воды в системах кондиционирования воздуха в технологических линиях металлургического производства.

В основу полезной модели поставлена задача повышения экономичности холодильной установки и обеспечение экологической чистоты окружающей среды. Поставленная задача достигается тем, что в конструкции абсорбционной холодильной установки для охлаждения воды в системах кондиционирования воздуха сталеплавильных цехов, включающей генератор хладагента, заполненный рабочим телом-хладагентом, источник теплоты, конденсатор, испаритель и абсорбер, согласно полезной модели, генератор хладагента посредством трубопровода гидравлически связан с источником теплоты — утилизации теплоты дымовых газов сталеплавильных цехов, а в качестве рабочего тела-хладагента использован раствор бромида лития.

Технический результат холодильной установки заключается в утилизации теплоты дымовых газов основного производства сталеплавильных цехов и в улучшении экологии окружающей среды.

ПАТЕНТ 6811 РБ, МПК7 В 21В 1/16. АРМАТУРНЫЙ СТЕРЖЕНЬ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Патентообладатель: Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод».

Изобретение относится к черной металлургии, в частности к прокатному производству, а точнее, к арматурным элементам, предназначенным для армирования железобетонных конструкций.

Технический результат, достигаемый при использовании изобретения, состоит в повышении эксплуатационных характеристик арматурного стержня за счет улучшения сцепления его с бетоном, в том числе повышении устойчивости арматурного стержня малых профила размеров к продольному скручиванию в бетоне, без усложнения технологичности его производства.

Решение поставленной задачи обеспечивается тем, что арматурный стержень периодического профиля содержит сердечник и расположенные на поверхности сердечника наклонные выступы, выполненные по многозаходной винтовой линии, вершины которых ограничены окружностью диаметром, равным большей оси поперечного сечения сердечника.

Исследованиями установлено, что использование заявляемого арматурного стержня позволяет существенно повысить устойчивость профиля к продольному скручиванию.

Заявляемый арматурный стержень за счет оптимизации его геометрических параметров высокоэффективен при применении в железобетонных конструкциях и вполне технологичен для условий производства такого вида продукции на современных мелкосортных и проволочных станах.

Документы не продаются!

Ознакомиться с предложенными изданиями можно в читальном зале патентных документов Республиканской научно-технической библиотеки (к. 503). Библиотека также оказывает дополнительные услуги по копированию и сканированию фрагментов документов, записи на дискету, CD-ROM, флэш-карту и др. Более подробную информацию о режиме работы и услугах можно получить по адресу: 220004, г. Минск, проспект Победителей, 7, РНТБ, тел. 203-31-00, www.rlst.org.by, e-mail: edd@rlst.org.by