

**ДОНЕЦКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

ВОЙИСЛАВ П. ДРАГОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНОГО СЛИТКА**

Специальность 05.16.02 — «Металлургия черных металлов»

А в т о р е ф е р а т
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1994

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Голдинг Компани Железара Д. Д. — Никшич и в Донецком Государственном техническом университете.

Научный консультант — канд. техн. наук, доцент В. П. Шевченко.

Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. А. Курганов; канд. техн. наук М. К. Додонов.


Ведущее предприятие — Донецкий металлургический завод.

Защита состоится «26» Мая 1994 году в 12 часов 20 мин. на заседании специализированного совета Д 068.20.01 Донецкого Государственного технического университета по адресу: 340000, г. Донецк, ул. Артема, 58, 5-й учебный корпус, ауд. 353.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого Государственного технического университета.

Автореферат разослан «25» апреля 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

 В. С. САПИРО

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00802227 (L)

м. В. Стефанік
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время в мире существует тенденция расширения производства непрерывной разливки стали. Несмотря на это, разливка стали в изложницы весьма актуальна и производство стали в слитках все еще занимает значительное место, особенно в производстве высококачественных марок стали.

В цепи производственных процессов, которые ведут от железной руды до конечного продукта, слитковая разливка стали занимает очень важное место и обеспечивает высокое качество производства специальных сталей.

Для различных марок стали нужны различные размеры и конфигурации слитков, что требует большого числа типов слитков и связанные с этим существенные затраты.

Цель работы.

Обеспечение прямого расчета основных параметров стального слитка любой конфигурации и повышение степени точности расчета.

Научная новизна.

В работе исследованы и внедрены модели расчета основных параметров слитка всех конфигураций: "сжатая" форма для слитков любой конфигурации и форма модели для каждого поперечного сечения (квадратного, круглого, многоугольного, прямоугольного). Впервые дано соотношение приведенного и среднего диаметра, их зависимость от конусности и отношения высоты слитка к приведенному диаметру, что обеспечило прямой расчет основных параметров здоровой части слитка.

Практическая ценность и реализация.

Практическое значение работы заключается в том, что при минимальном количестве исходных данных можно выполнить расчет основных размеров слитка, имеющего любую конфигурацию. Результаты работы могут быть использованы специалистами, которые занимаются конструированием слитков.

Фактический экономический эффект от внедрения в производство слитков, спроектированных по предложенной модели на заводе Железоро-Никшич составил в 1992 г. 60 миллионов динаров.

Апробация работы.

Работа обсуждена на комиссии научно-исследовательских работ

Металлургического института в Никшиче (Югославия) 1967 и 1992 года, металлургическом институте в Любляне (Словения) 1988 г., на факультете природных и технологических наук в Любляне, 1989 г., на семинаре "Математическое моделирование технологических процессов" АН УССР, Донецкий политехнический институт, 26.06.92 г.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 статей.

Объем работы.

Работа состоит из введения, 4 разделов и приложений. Изложена на 159 страницах машинописного текста. Содержит две таблицы, 6 рисунков и список использованной литературы из 50 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Усовершенствованию слитков и соответственно изложниц посвящен ряд изобретений в различных странах мира.

На металлургических предприятиях используются слитки, отливаемые в изложницы различных форм и размеров. Но зачастую они не удовлетворяют тем требованиям, которые предъявляются условиями производств, и уровню качества металла, что вызывает необходимость разработки их новых конфигураций. В связи с этим, разработка и обоснование практического метода расчета основных параметров слитка является важной задачей в металлургии.

Предложены различные комбинации выпуклых и вогнутых граней слитка. Многие авторы предлагают внутреннюю поверхность изложниц делать волнистой, чтобы снизить термические напряжения в слитке за счет уменьшения воздушного зазора между корочкой и стенкой изложницы. Однако, волнистость поверхности граней изложницы уменьшает стойкость изложниц и такие изложницы менее удобны в эксплуатации.

Исследование влияния формы изложницы на затвердевание слитка и напряжений в нем и на базе этого выбор рациональной формы изложницы были проведены академиком Ефимовым В.А.

Им были проанализированы силы, действующие на корочку слитка в начальный период затвердевания. Сила давления жидкости всегда направлена по нормали к поверхности и пропорциональна ее площади. Давление на угол слитка значительно меньше, чем на его грани, а

увеличение радиуса угла слитка вызывает большее ферростатическое давление и способствует развитию более значительных напряжений.

Это положение было проверено экспериментально методом выливания. Установлено, что трещин не имели те углы слитка, радиус которых был равен примерно 10% от диаметра слитка в данном сечении.

На практике радиус закругления углов принимают равным 6-10% от размера стороны поперечного сечения. Для крупных слитков радиус не рекомендуют выбирать более 70 мм во избежание образования угловых продольных трещин.

Наилучшей формой поперечного сечения слитка В.А. Едимов считает квадратный контур с волнистыми гранями. Приведены обобщенные результаты экспериментального изучения состояния поверхности слитков в зависимости от температуры стали на выпуске из печи. Как следует из проведенных исследований, слитки с прямыми гранями при всех значениях температуры имеют большее количество дефектов, чем слитки с волнистыми гранями. Лучшие результаты состояния поверхности слитков получены при температуре 1610-1630°C. При этой температуре общее количество дефектов на слитках с волнистыми гранями примерно в 2+2,5 раза меньше, чем на слитках с прямыми гранями. В.А. Едимов объясняет это тем, что отношение площади поперечного сечения к поверхности охлаждения для волнистых слитков получается минимальным и такая форма способствует более равномерному распределению усадки по периметру слитка.

Форма и геометрические размеры слитков должны обеспечивать получение таких напряжений в затвердевающей корочке, которые были бы меньше предела прочности стали при высоких температурах. Следовательно, для учета возможного образования трещин необходимо исследование напряжений в твердой корочке слитка.

Под влиянием неоднородного температурного поля в корочке формирующегося слитка возникают термические и механические напряжения.

Появление термических напряжений обусловлено перепадом температуры по толщине закристаллизовавшегося слоя металла. Вследствие неодинаковой температуры наружных и внутренних слоев, корочка стремится прогнуться выпуклостью в сторону более горячей поверхности. Этому прогибу препятствуют соседние грани слитка и давление жидкого металла, что и приводит к возникновению растягивающих напряжений на поверхности слитка.

В процессе затвердевания стали в результате усадки, корка слитка отходит от стенок изложницы. Это уменьшает тепловой поток и приводит к повышению температуры корочки, из-за чего снижается ее прочность. При этом под действием ферростатического давления жидкого металла в корке возникают напряжения торможения усадки.

Расчету напряжений по известному температурному полю посвящено много исследований авторами многих стран.

Термические напряжения в общем виде могут быть определены как:

$$\sigma = A \Delta T \frac{\alpha E}{1 - \nu^2}$$

где A - коэффициент, учитывающий распределение температуры по сечению.

Изучались свойства металлов при высоких температурах, которые в некоторой мере зависят от конфигурации кристаллизующегося слитка. На основании экспериментальных данных полученных свойств металлов при высоких температурах можно сказать следующее.

Температурная зависимость предела прочности сталей обнаруживает перелом, сопровождающийся резким падением прочности при температуре, совпадающей с солидусом, либо отклоняющейся от него на несколько градусов. Выше солидуса предел прочности монотонно понижается до нуля, сохраняя конечные значения в большей части интервала кристаллизации.

Температурная зависимость пластичности сталей имеет вид кривой с минимумом, совпадающим с температурой солидус. Внутри интервала кристаллизации пластичность стали монотонно нарастает в твердо-жидком состоянии и резко увеличивается при переходе к жидко-твердому состоянию.

Механические свойства сплавов в двухфазной области обнаруживают зависимость от скорости деформации. Предел прочности растет, а относительное удлинение падает с ростом скорости деформации. Темп изменения характеристик тем больше, чем ближе температура испытания к солидусу.

Сильное влияние на механическое поведение сталей в двухфазном состоянии оказывает содержание углерода. Сталь с содержанием $0,19+0,21\%$ С имеет минимальную пластичность. В этом интервале концентраций углерода сталь имеет наибольший предел прочности.

Из обзора литературных данных следует, что форма конфигурации стального слитка в значительной мере определяет возникновение

и концентрацию напряжений в кристаллизирующейся корочке слитка, особенно в начальный период. Приведенный анализ термических и механических напряжений в корочке формирующегося слитка под влиянием неоднородного температурного поля подтверждает это. Поэтому разработка обоснованного метода конструирования слитка в настоящее время остается важной задачей металлургии.

1.1. Существующие способы расчета геометрических размеров слитка

Основные принципы конструирования слитка сводятся к следующему:

- для повышения производительности обжимного стана, слиток должен иметь максимальный вес и прокатываться с минимальным количеством пропусков;

- форма поперечного и продольного сечений слитка должна удовлетворять условиям его формирования с минимальным количеством поверхностных дефектов, соответствовать производительности нагревательных колодцев и прокатного оборудования;

- слиток должен иметь плотную макроструктуру при минимальном расходе металла на головную и донную обрезь;

- для производства слитка необходимо применение изложницы, удобной в эксплуатации и достаточной по сроку службы при минимальном расходе ее материала на тонну разливаемой стали.

В соответствии с этими принципами разрабатывается и конструкция изложницы, которая определяется весом слитка, его поперечным сечением, конусностью и высотой, а также наружным очертанием. В зависимости от требований, предъявляемых к слиткам, каждый из указанных параметров может изменяться в довольно широких пределах.

В каждом отдельном случае вес слитка определяется весом прокатываемого изделия, мощностью прокатного стана, длиной рольгангов, сортаментом выплавляемых сталей и требованиями к качеству металла. Основной задачей при конструировании слитка является определение таких его оптимальных размеров, которые соответствовали бы условиям прокатного цеха и при которых обеспечивалось бы получение качественного металла и точная кратность веса слитка с весом прокатываемой заготовки.

При определении веса слитка и его размеров рекомендуется придерживаться следующего порядка расчета:

1) В соответствии с сортаментом прокатываемых профилей и раскроем проката на целое число штук, определяется вес годной части слитка:

$$G_{\text{год}} = q \cdot l \cdot n, \text{ т}$$

где: q - вес 1 пог. м расчетного профиля, т/м;

l - длина 1 штуки (заготовки), м;

n - число штук, на которые раскраивается раскат.

2) На основании опыта работы заводов принимают процент головной ($\Phi_{\text{г.обр}}$) и донной ($\Phi_{\text{д.обр}}$) обрезки, а также угара ($\Phi_{\text{уг}}$) и определяют полный вес слитка

$$G_{\text{сл}} = \frac{G_{\text{год}}}{1 - \frac{\Phi_{\text{г.обр}} + \Phi_{\text{д.обр}} + \Phi_{\text{уг}}}{100}}, \text{ т}$$

3) При определении веса слитка спокойной стали необходимо учитывать, что на ножницах вместе с головной частью обрезается около 1% тела слитка, поэтому вес тела слитка, соответствующий полости изложницы, составляет

$$G_{\text{т.сл}} = \left[G_{\text{год}} + \frac{\Phi_{\text{д.обр}} + 1}{100} \cdot G_{\text{сл}} \right] \cdot \left[1 + \frac{\Phi_{\text{уг}}}{100} \right] \cdot \tau$$

Зная плотность жидкой стали, находят объем тела слитка

$$V_{\text{т.сл}} = \frac{G_{\text{т.сл}}}{\gamma}, \text{ м}^3$$

4) Определяют условный или приведенный размер стороны среднего сечения слитка D и его площадь $F_{\text{ус}}$, считая слиток квадратным и принимая отношение $\eta = \frac{H}{D} = 3$;

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{т.сл}}}{\eta}}, \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения слитка

$$F_{\text{ус}} = D^2, \text{ м}^2$$

5) В соответствии с принятым отношением $\eta = \frac{H}{D}$, определяют высоту тела слитка: $H = \eta \cdot D$, м.

Из приведенного способа расчета геометрических размеров слитка следует, что в основу конструирования слитка закладываются данные (коэффициенты), имеющие ориентировочные значения, которые не могут учесть весь комплекс технологических данных. С другой стороны, учесть необходимое требование по качеству металла и обеспечить технологичность производства запроектированного слитка.

В практике конструирования слитка имеют место и другие способы, основанные на разработке математических программ и выполнении расчетов с применением ЭВМ. Все они имеют существенные недостатки, не позволяющие получить необходимые параметры слитка без дополнительных пересчетов. Поэтому совершенствование методик расчета, получение практического способа для оперативного конструирования слитков крайне необходимо для современного уровня металлургического производства при крайне частой смене типоразмеров слитка.

1.2. Обоснование выбранного направления и методов исследования

В 1976 г. автор был членом специальной группы по проектированию слитка в новом цехе блюминга $\varnothing 900 \times 2100$ при металлургическом заводе в Никшиче, Черногория, Югославия.

В это время металлургический завод в Никшиче был предприятием без большой металлургической практики, с отсутствием квалифицированных кадров, занимающихся проблемами проектирования слитка. В связи с этим, была проведена обработка литературных данных, необходимых для конструирования слитка, систематизированы данные и чертежи изложниц и слитков, собранные из различных заводов по производству стали, которые были рассортированы по группам марок стали.

Систематизированы рекомендации консультирующих фирм, привлеченных к реализации Программы по модернизации: Creusot Loire, ЛенГипромет, Вогога и др. В особенности, в материалах Creusot Loire была подробно приведена рекомендация по выбору максимального поперечного сечения слитка, что ограничивало массу слитка.

С учетом того, что Creusot Loire был главным консультантом по программе модернизации завода, по существу его рекомендации оказались результатом совместной работы и согласования мнений специалиста консультанта и специалистов металлургического завода.

Характеристиками вспомогательных установок блюминга являются: ограниченные длины подводящего и отводящего рольгангов и, к тому же, необходимость производить на нем обжатые бляхи 150×150 мм при доброкачественной переработке. Ограничение максимального общего веса слитка до 2800 кг, притом самое тонкое сечение слитка не должно быть ниже 400×400 мм. С консультантом Creusot Loire согласовано относительно того, что запроектированной программе производства больше всего соответствует соотношение высоты и

толщины слитка, равное 3 при конусности примерно 4%.

Большие производственные требования и ограничения, которые следовало удовлетворить, усложняли задачу, требующую качественно-го решения.

Изучение литературных данных сосредоточило наше внимание на использовании рекомендаций, отраженных в научной литературе. Также, группа, работавшая над конструированием слитка, воспользовалась собранными данными о слитках и изложницах, используемых на металлургических заводах развитых, в техническом отношении, стран, с близкой программой производства по отношению к качеству изделий и с подобными характеристиками блюминга. И, таким образом, изготовлен слиток весом 2,8 тонн, с поперечным сечением 540x540/ 420x420 мм, высотой 1500 мм с конусностью $k=4\%$ и соотношением высоты и толщины слитка, равным около 3.

Работа по определению основных размеров слитка оказалась весьма сложной, так как они рассчитывались косвенным путем, посредством выбора основных размеров из таблиц (литературы) или из практики некоторых других заводов и их адаптации к местным условиям, проводя дополнительные расчеты. Поэтому было решено приступить к исследованиям с целью получить модель прямого расчета основных размеров слитка на основании металлургических потребностей ("к" и "η") и производственных требований (характеристик блюминга, качеств продукции - степень обжата при прокатке самого толстого размера, характеристика нагревательных печей и пр.).

В результате проведенных исследований получена необходимая модель, при помощи которой по заданной конусности "к" и отношению высоты и толщины "η", данного как отношение высоты слитка и приведенного диаметра, с одним (любым) физическим размером слитка, в расчете определяются все остальные размеры слитка с точностью, определяемой точностью компьютера.

Теоретическое обоснование выбора рациональной конфигурации основано на изучении возникновения и концентрации напряжений в кристаллизующейся корочке слитка, а также на изучении теплофизических особенностей кристаллизации стали. Исследования носят эмпирический характер. Практическое определение основных размеров здоровой части тела слитка основывается на рекомендациях, представленных в таблицах, требующих последующих расчетов.

Для обеспечения качества слитковой стали особенно важно создать такие условия разливки, которые при затвердевании обеспе-

чивали бы хорошую физическую плотность металла с минимумом дефектов в осевой части слитка, а также и хорошую химическую однородность во внеосевой части слитка.

На регулирование кристаллизации значительно влияют конусность слитка и отношение высоты к толщине слитка, рассчитанного как отношение высоты слитка к приведенному диаметру.

Конусность и отношение высоты слитка к приведенному диаметру (толщина слитка) в расчетах применяются во взаимосвязи.

Повышенная конусность и уменьшенное отношение высоты слитка к приведенному диаметру способствуют переходу горизонтального направления кристаллизации в вертикальное, т.е. создают условия развития кристаллизации и позитивно влияют на физическую однородность и плотность осевой части слитка, при этом несколько ухудшается химическая однородность слитка из-за увеличения внеосевой сегрегации.

Величины конусности и отношения высоты слитка к его толщине, которые определяют как физическую плотность осевой части слитка, так и химическую однородность его внеосевой части, необходимо иметь в допустимых пределах, потому что нарушение корреляции этих величин может привести к отрицательным эффектам:

- выраженной химической неоднородности;
- дефектам разливки (для слитков небольшого веса);
- недостаточному обжатию сердцевин "толстых" слитков с весьма выраженной конусностью и малым отношением высоты слитка к его толщине.

При производстве слитков с плотной структурой осевой зоны, процесс затвердевания необходимо вести так, чтобы обеспечить объемную кристаллизацию. Кривые горизонтального и вертикального затвердевания должны пересекаться или на самой вершине слитка ($H/D = H/D_{кр}$), или под самой прибылью ($H/D < H/D_{кр}$), - это обеспечивает плотность осевой части слитка с несколько возросшей химической неоднородностью внеосевой части слитка, а также приводит к максимальному выходу годного.

При производстве слитков для труб, полых заготовок, процесс затвердевания слитка необходимо вести с обеспечением радиального фронта кристаллизации с тем, чтобы получить хорошую химическую однородность внецентральной части слитка за счет уменьшения сегрегации, что обеспечивает плотную структуру стен труб, полых профилей и колец.

Учитывая возросшие требования к изменению сортамента слитков, возрастают и требования к их проектированию с оптимизацией расчета основных параметров слитка. В связи с этим модель расчета должна удовлетворять современным требованиям науки и практики в металлургии. Для оперативного конструирования слитка необходимо вводить ограниченное количество исходных данных. Математическое моделирование и оптимизация расчета основных параметров слитка - основная цель настоящей работы.

Из литературного обзора следует, что прогресс технологии производства стали требует непрерывных изменений и усовершенствований конфигурации стального слитка, чтобы обеспечить физические и химические свойства стали, как и минимальный расход изложниц. Это приводит к повышению числа типов слитков во всех сталеплавильных цехах, а, следовательно, и к расширению работ по их проектированию.

В металлургической литературе уделяется существенное внимание моделированию и усовершенствованию стального слитка, но не уделяется достаточно внимания способам прямого расчета основных параметров слитка, зависящих только от одного "физического" размера слитка. При расчетах используются различные рекомендации по расчетам с использованием таблиц, дополнительных экстраполяционных расчетов, при этом конечные результаты лишь ориентировочно отвечают поставленной задаче.

Для быстрого и точного расчета предпочтительнее иметь возможность прямого расчета на основе заданных величин конусности, отношения высоты и приведенного диаметра и какого-либо основного физического размера. Эта задача решена путем создания математической модели, учитывающей эти условия. В качестве физической характеристики может быть величина максимального или минимального поперечного сечения, высота слитка, его вес или объем.

Цель исследования.

Для решения указанной проблемы поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод прямого определения основных размеров слитка, обеспечивающий качественные показатели металлопродукции и удовлетворяющий требования условий производств металлургических предприятий.

2. Вывести математическую модель расчета основных параметров

слитка, исходя из любого показателя (стороны поперечного сечения, высоты здоровой части слитка, объема, массы слитка) и металлургических характеристик: конусности и отношения высоты к "толщине" слитка, выраженного как отношение высоты здоровой части слитка к его приведенному диаметру.

3. Создать математическую программу расчета основных параметров слитка, имеющего любую конфигурацию поперечного сечения.

4. Проиллюстрировать работу данной программы на конкретном примере.

Идея работы заключается в упрощении системы расчетов при конструировании слитков и повышении их практической надежности.

Исследования проведены в этапах, исходя из расчетов для случая использования величины отношения высоты слитка и среднего диаметра. Далее проведены многофазные исследования для получения прямого расчета и конечной модели. Полученные формулы многофазного исследования были использованы как промежуточные формулы при исследовании расчета с отношением высоты слитка и приведенного диаметра. Многофазные расчеты дали результаты, благодаря которым можно было определять основные размеры слитка. Но эти системы расчета являлись громоздкими в условиях эксплуатации, что потребовало их упрощения и получения более удобной формулы. Найден фактор, который характеризует отношение приведенного диаметра к среднему, который является присущим для всех слитков любых конфигураций.

Этот фактор выражается формулой

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}}$$

и представляет основное звено расчетов.

Используя этот фактор, создана модель для расчетов основных параметров слитков квадратного, круглого, многоугольного и прямоугольного поперечного сечения.

Особое внимание уделяется влиянию конусности и отношения высоты слитка к приведенному диаметру, которые дается в сопряжении, так как оказывает определяющее влияние на строение и плотность слитка. Для перевода "разработанной" формы модели в единственную "сжатую" форму введен модификатор "ω", который позволяет вести расчет основных параметров здоровой части слитка любой конфигурации.

В автореферате представлена "сжатая" форма модели, как и "разработанная" форма, но только для слитков квадратного и многоугольного сечения.

Примеры расчета в конце автореферата проведены по "разработанной" форме модели.

2. МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА СЛИТКОВ

Модель приводится в трех видах для всех входных и определяемых размеров по видам поперечного сечения слитка.

а) Сжатая форма модели, пригодная для опубликования в литературе, охватывающая область проектирования слитка и конструкцию изложниц. В данном варианте текст является сжатым, а выражения упрощены включением некоторых факторов (f, ω), во избежание громоздкости выражений.

К сжатой форме модели, которая на самом деле представляет собой резюме совокупной работы и ее основную ценность, даны пояснения используемых символов и выражений.

б) Разработанная форма модели для всех заданных и требуемых величин.

в) Развернутая - в виде таблицы модели.

Пояснение:

k - конусность слитка дана в процентах, а выражена в долях. Общая конусность слитка прямоугольного поперечного сечения составляет: $k = \sqrt{k_a k_b}$;

η - отношение высоты к толщине слитка выражено как отношение высоты слитка к приведенному диаметру. В слитке прямоугольного поперечного сечения отношение составляет $\eta = \sqrt{\eta_a \eta_b}$, причем η_a и η_b представляют собой отношения высоты слитка к условным сторонам прямоугольника ($a_{\text{усл}} = f a_{\text{ср}}$; $b_{\text{усл}} = f b_{\text{ср}}$);

$a_{\text{макс}}, a_{\text{ср}}, a_{\text{мин}}$ - стороны квадрата, прямоугольника, многоугольника, в соответствующих поперечных сечениях. Все соотношения из данной таблицы, служащие для определения $a_{\text{макс}}, a_{\text{ср}}$ и $a_{\text{мин}}$, можно применить при нахождении $b_{\text{макс}}, b_{\text{ср}}, b_{\text{мин}}$ прямоугольного сечения или $D_{\text{макс}}, D_{\text{ср}}, D_{\text{мин}}$ круглого поперечного сечения слитка.

H - высота слитка;

V - объем слитка;

Таблица. Сжатая форма модели

| Требуется опре- делить | Заданные значения | | | | |
|------------------------------|---|--|--|---------------------------------------|---|
| | $a_{\text{макс}}$ | $a_{\text{ср}}$ | $a_{\text{мин}}$ | H | v |
| $a_{\text{макс}}$ | — | $a_{\text{ср}}(1 + k\eta f)$ | $a_{\text{мин}} \frac{(1 + k\eta f)}{(1 - k\eta f)}$ | $\omega \frac{H}{\eta} (1 + k\eta f)$ | $\omega \sqrt[3]{\frac{3v f^2}{\eta(f^2 + 2)}} (1 + k\eta f)$ |
| $a_{\text{ср}}$ | $\frac{a_{\text{макс}}}{(1 + k\eta f)}$ | — | $\frac{a_{\text{макс}}}{(1 - k\eta f)}$ | $\omega \cdot \frac{H}{\eta}$ | $\omega \sqrt[3]{\frac{3v f^2}{\eta(f^2 + 2)}}$ |
| $a_{\text{мин}}$ | $a_{\text{макс}} \frac{(1 + k\eta f)}{(1 - k\eta f)}$ | $a_{\text{ср}}(1 - k\eta f)$ | — | $\omega \frac{H}{\eta} (1 - k\eta f)$ | $\omega \sqrt[3]{\frac{3v f^2}{\eta(f^2 + 2)}} (1 + k\eta f)$ |
| $D_{\text{пр}}$ | $\frac{f \sqrt{F_{\text{мин}}}}{(1 + k\eta f)}$ | $f \sqrt{F_{\text{ср}}}$ | $\frac{f \sqrt{F_{\text{мин}}}}{(1 - k\eta f)}$ | $\frac{H}{\eta}$ | $\omega \sqrt[3]{\frac{3v f^2}{\eta(f^2 + 2)}}$ |
| H | $\frac{\eta f \sqrt{F_{\text{макс}}}}{(1 + k\eta f)}$ | $\eta f \sqrt{F_{\text{ср}}}$ | $\frac{\eta f \sqrt{F_{\text{мин}}}}{(1 - k\eta f)}$ | — | $\omega \sqrt[3]{\frac{3v f^2 \eta^2}{(f^2 + 2)}}$ |
| v | $\frac{\eta f F_{\text{макс}}^{1.5} (f^2 + 2)}{3(1 + k\eta f)^3}$ | $\frac{\eta f F_{\text{ср}}^{1.5} (f^2 + 2)}{3}$ | $\frac{\eta f F_{\text{мин}}^{1.5} (f^2 + 2)}{3(1 - k\eta f)^3}$ | $\frac{H^3 (f^2 + 2)}{3 \eta^2 f^2}$ | — |

$D_{\text{пр}}$ - приведенный диаметр, входящий в формулу, отображающую отношение высоты к толщине слитка, а по существу представляет цифровое значение квадратного корня из средней площади максимального и минимального поперечного сечения слитка;

f - отношение приведенного диаметра к квадратному корню из площади среднего поперечного сечения слитка:

$$f = \frac{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}}{1 - k^2 \eta^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}}$$

ω - модификатор фактора f в зависимости от вида поперечного сечения слитка:

| квадратное | прямоугольное | круглое | многоугольное |
|------------------------|--|-----------------------------------|---|
| $\omega = \frac{1}{f}$ | $\omega_a = \frac{\sqrt{\rho}}{f}$ $\omega_b = \frac{1}{f \sqrt{\rho}}$ | $\omega = \frac{2}{f \sqrt{\pi}}$ | $\omega = \frac{2}{f \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}$ |

ρ - отношение более длинной к более короткой стороне прямоугольника;

α - центральный угол многоугольника;

n_1 - число сторон многоугольника.

Разработанные формы модели

2.1. Для слитка квадратного сечения

2.1.1. Известна длина стороны квадрата поперечного сечения слитка в месте максимальной толщины

$$a_{\text{ор}} = \frac{a_{\text{макс}}}{1 + k \eta f}$$

$$a_{\text{мин}} = a_{\text{макс}} \frac{1 - k \eta f}{1 + k \eta f}$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{f a_{\text{макс}}}{1 + k \eta f}$$

$$H = \frac{\eta f a_{\text{макс}}}{1 + k \eta f}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{макс}}^3 (f^2 + 2)}{3(1 + k \eta f)^3}$$

2.1.2. Известна длина стороны квадрата поперечного сечения слитка на середине высоты

$$a_{\text{макс}} = a_{\text{ср}} (1 + k \eta f)$$

$$a_{\text{мин}} = a_{\text{ср}} (1 - k \eta f)$$

$$D_{\text{пр}} = f a_{\text{ср}}$$

$$H = \eta f a_{\text{ср}}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{ср}}^3 (f^2 + 2)}{3}$$

2.1.3. Известна длина стороны квадрата поперечного сечения слитка в месте минимальной толщины

$$a_{\text{макс}} = a_{\text{мин}} \frac{(1 + k \eta f)}{(1 - k \eta f)}$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_{\text{мин}}}{(1 - k \eta f)}$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{f a_{\text{мин}}}{(1 - k \eta f)}$$

$$H = \frac{\eta f a_{\text{мин}}}{(1 - k \eta f)}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{мин}}^3 (f^2 + 2)}{3(1 - k \eta f)^3}$$

2.1.4. Известна высота слитка

$$D_{\text{пр}} = \frac{H}{\eta}$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{H}{\eta f}$$

ДНБ ім. В. Стефаника
АН України

$$H = \sqrt[3]{\frac{3V f^2 \eta^2}{(f^2+2)}}$$

2.2. Для слитка многоугольного поперечного сечения

Соотношение для определения приведенного диаметра в случае известных размеров максимального и минимального поперечного сечений слитка описывается выражением:

$$D_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{(a_{\text{макс}}^2 + a_{\text{мин}}^2) n_1 \operatorname{ctg}\alpha}{8}}$$

2.2.1. Известна длина стороны многоугольника поперечного сечения слитка в месте максимальной толщины

$$a_{\text{мин}} = a_{\text{макс}} \frac{1 - k \eta f}{1 + k \eta f}$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_{\text{макс}}}{1 + k \eta f}$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{f a_{\text{макс}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg}\alpha}}{2(1 + k \eta f)}$$

$$H = \frac{f \eta a_{\text{макс}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg}\alpha}}{2(1 + k \eta f)}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{макс}}^3 n_1 \operatorname{ctg}\alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg}\alpha} (f^2+2)}{24(1 + k \eta f)^3}$$

2.2.2. Известна длина стороны многоугольника поперечного сечения слитка на середине высоты

$$a_{\text{макс}} = a_{\text{ср}} (1 + k \eta f)$$

$$a_{\text{мин}} = a_{\text{ср}} (1 - k \eta f)$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{f a_{\text{ср}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}{2}$$

$$H = \frac{f \eta a_{\text{ср}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}{2}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{ср}}^3 n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha} (f^2 + 2)}{24}$$

2.2.3. Известна длина стороны многоугольника поперечного сечения слитка в месте минимальной толщины

$$a_{\text{макс}} = a_{\text{мин}} \frac{1 + k \eta f}{1 - k \eta f}$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_{\text{мин}}}{1 - k \eta f}$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{f a_{\text{мин}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}{2(1 - k \eta f)}$$

$$H = \frac{f \eta a_{\text{мин}} \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}{2(1 - k \eta f)}$$

$$V = \frac{\eta f a_{\text{мин}}^3 n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha} (f^2 + 2)}{24(1 - k \eta f)^3}$$

2.2.4. Известна висота слитка

$$D_{\text{пр}} = \frac{H}{\eta}$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{2H}{\eta f \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}$$

$$a_{\text{макс}} = \frac{2H(1 + k \eta f)}{\eta f \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}$$

$$a_{\text{мин}} = \frac{2H(1 - k \eta f)}{\eta f \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha}}$$

$$V = \frac{H^3(f^2+2)}{3\eta^2 f^2}$$

2.2.5. Известен объем слитка

$$a_{\text{макс}} = (1 + k \eta f) \sqrt[3]{\frac{24V}{\eta f n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha} (f^2+2)}}$$

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{24 V}{\eta f n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha} (f^2+2)}}$$

$$a_{\text{мин}} = (1 - k \eta f) \sqrt[3]{\frac{24 V}{\eta f n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha} (f^2+2)}}$$

$$D_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{3V f^2}{\eta (f^2+2)}}$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{3V f^2 \eta^2}{(f^2+2)}}$$

3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛИТКА ПО РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В настоящем разделе приводятся примеры расчета различных конфигураций слитка (для двух видов поперечных сечений), причем в отдельности для разработанной и сжатой формы модели.

После выполненного расчета проведено округление основных размеров слитка до нуля или пяти, что привело к соответствующим незначительным изменениям остальных параметров слитка, как это указывается в тексте.

3.1. Слиток квадратного поперечного сечения

Задание: определить основные размеры слитка квадратного поперечного сечения при известных величинах:

- объем здоровой части слитка (без прибыли): $V=0.52 \text{ м}^3$,
т.е. $V=520000000 \text{ мм}^3$;
- конусность слитка 4% ($k=0.04$)
- отношение высоты слитка к приведенному диаметру: $\eta=3.125$.

3.1.1. Расчет с учетом разработанной формы модели

Вначале находится коэффициент "f":

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}} = 1.007905261,$$

затем следует приступить к прямому определению размеров слитка:

$$a_{\text{макс}} = 3 \sqrt{\frac{3V}{\eta f (f^2 + 2)}} (1 + k\eta f) = 616.6154856$$

$$a_{\text{мин}} = 3 \sqrt{\frac{3V}{\eta f (f^2 + 2)}} (1 - k\eta f) = 478.6278017$$

Настоящая модель впервые позволяет получить приведенный диаметр (в том числе и остальные параметры слитка) на основании только одного известного фактора, в данном случае - известного объема:

$$D_{\text{пр}} = 3 \sqrt{\frac{3V f^2}{\eta (f^2 + 2)}} = 551.9507356$$

Высота слитка как "физический" размер согласно модели:

$$H = \eta D_{\text{пр}} = 1724.846045 \text{ мм.}$$

Округление значений размеров

Так как $a_{\text{макс}}$, $a_{\text{мин}}$ и H являются основными "физическими размерами слитка", т.е. изложницы, в которую разливается слиток, то эти размеры округляются и описываются целыми значениями, причем конечная цифра ноль или пять (0 или 5).

Если в приведенном примере эти значения округлить до нуля, то имеем:

$$a_{\text{макс}} = 620 \text{ мм},$$

$$a_{\text{мин}} = 480 \text{ мм},$$

$$H = 1730 \text{ мм}.$$

Округление приводит к изменению:

- конусности (k);
- приведенного диаметра ($D_{\text{пр}}$);
- отношения высоты слитка и приведенного диаметра (η);
- коэффициента (фактора f);
- объема слитка (V).

Новыми (измененными) значениями относительно указанных параметров являются:

$$k = \frac{\sqrt{F_{\text{макс}}} - \sqrt{F_{\text{мин}}}}{2H} = 0.40462426$$

$$D_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{F_{\text{макс}} + F_{\text{мин}}}{2}} = 554.436651$$

$$\eta = \frac{H}{D_{\text{пр}}} = 3.120284341$$

$$f = \frac{1}{\eta^2} = 1.008066636$$

$$\sqrt{1 - k^2 \eta^2}$$

$$V = \frac{\eta D_{\text{пр}}^3 [f^2 + 2]}{3f^2} = 526150668.2 \text{ мм}^3$$

Следовательно, основными параметрами здоровой части слитка будут:

$$a_{\text{макс}} = 620 \text{ мм},$$

$$a_{\text{мин}} = 480 \text{ мм},$$

$$H = 1730 \text{ мм}.$$

$$D_{\text{пр}} = 554.436651$$

$$k = 0.40462426$$

$$\eta = 3.120284341$$

Настоящим полностью представлен расчет основных параметров слитка квадратного поперечного сечения. Расчет выполнен на ЭВМ типа IBM PC по математической программе, изложенной на алгоритмическом языке Турбо Паскаль, версия 5. Конфигурация квадратного слитка показана на рис.1.

3.2. Слиток многоугольного поперечного сечения

Задание: определить основные размеры слитка восьмиугольного поперечного сечения ($n_1=8$), если известны:

- объем слитка: 0.6 м^3 , т.е. 600000000 мм^3 ;

- конусность слитка 5% ($k=0.05$);

отношение высоты слитка к приведенному диаметру: $\eta=2.6$.

3.2.1. Расчет согласно разработанной форме модели

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}} = 1.008558635;$$

$$a_{\text{макс}} = \sqrt[3]{\frac{24V (1 + k\eta f)^3}{\eta f n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha (f^2 + 2)}}} = 314.2447991 \text{ мм};$$

$$a_{\text{мин}} = \sqrt[3]{\frac{24V (1 - k\eta f)^3}{\eta f n_1 \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{n_1 \operatorname{ctg} \alpha (f^2 + 2)}}} = 241.3935924 \text{ мм};$$

$$D_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{3V f^2}{\eta (f^2 + 2)}} = 615.6958726;$$

$$H = \eta \cdot D_{\text{пр}} = 1600.809265 \text{ мм}.$$

Короткий контроль посредством определения приведенного диаметра:

$$D_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{(a_{\text{макс}}^2 + a_{\text{мин}}^2) n_1 \operatorname{ctg} \alpha}{8}} = 615.6958726;$$

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛИТКА

Введите характеристики слитка

Конусность слитка, % : 4.000 (k=0.040)
 Отношение высоты слитка к его приведенному диаметру : 3.125

Форма сечения

Квадрат
 Круг
 Многоугольник
 Прямоугольник

Будете задавать

Сторону большего сечения
 Сторону среднего сечения
 Сторону меньшего сечения
 Высоту тела слитка
 Объем слитка

Объем здоровой части слитка, м³ : 0.520
 Точность вычислений : до десятков

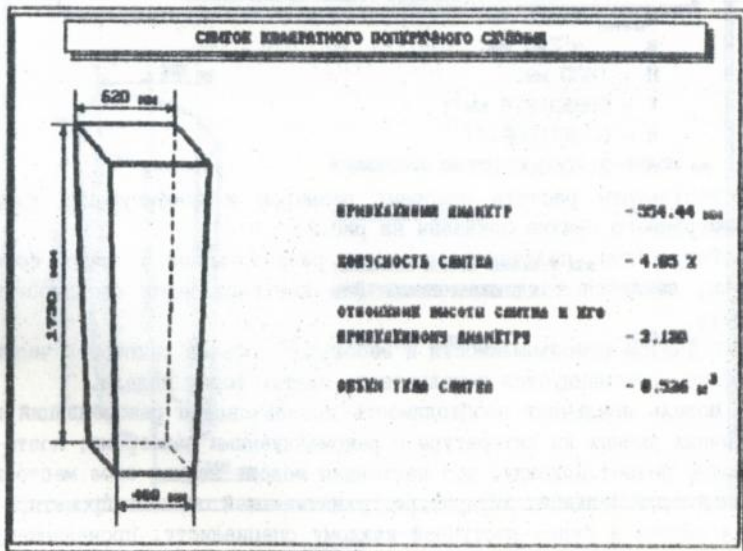


Рис. I

Округление значений размеров

$$a_{\text{макс}} = 315 \text{ мм};$$

$$a_{\text{мин}} = 240 \text{ мм};$$

$$H = 1600 \text{ мм}.$$

Новыми (измененными) значениями для остальных параметров слитка являются:

$$k = \frac{\sqrt{F_{\text{макс}}} - \sqrt{F_{\text{мин}}}}{2H} = 0.051500818$$

$$D_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{F_{\text{макс}} + F_{\text{мин}}}{2}} = 615.31215$$

$$\eta = \frac{H}{D_{\text{пр}}} = 2.600306202$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}} = 1.009089445$$

$$V = \frac{\eta D_{\text{пр}}^3 [f^2 + 2]}{3f^2} = 598531826 \text{ мм}^3$$

Следовательно, основными параметрами здоровой части слитка будут:

$$a_{\text{макс}} = 315 \text{ мм};$$

$$a_{\text{мин}} = 240 \text{ мм};$$

$$H = 1600 \text{ мм}.$$

$$V = 598531826 \text{ мм}^3;$$

$$k = 0.051500818;$$

$$\eta = 2.600306202.$$

Результаты расчета основных размеров и конфигурации тела восьмигранного слитка показаны на рис.2.

Результаты, полученные согласно разработанной и сжатой форм модели, являются тождественными. Это подтверждается сходимостью расчета.

С учетом всеобъемлимости и небольшого объема текстовой части и таблиц, рекомендуется использовать сжатую форму модели.

Модель исключает необходимость использования рекомендаций и табличных данных из литературы с рекомендуемыми размерами, поэтому автор питает надежду, что настоящая модель займет свое место в научной (специальной) литературе, охватывающей область проектирования слитка и будет доступной каждому специалисту, проявляющему интерес к данной проблеме.

| | |
|---|--|
| Введите характеристики слитка | |
| Конусность слитка, % : | 5.0 (k=0.050) |
| Отношение высоты слитка к его приведенному диаметру : | 2.6 |
| ----- | |
| Форма сечения <input type="checkbox"/> Квадрат <input type="checkbox"/> Круг <input checked="" type="checkbox"/> Многоугольник <input type="checkbox"/> Прямоугольник | Будете задавать <input type="checkbox"/> Сторону большего сечения <input type="checkbox"/> Сторону среднего сечения <input type="checkbox"/> Сторону меньшего сечения <input type="checkbox"/> Высоту тела слитка <input type="checkbox"/> Объем слитка |
| ----- | |
| Количество сторон многоугольника : | 8 |
| Объем здоровой части слитка, м ³ : | 0.6 |
| Точность вычислений : | до пяти |

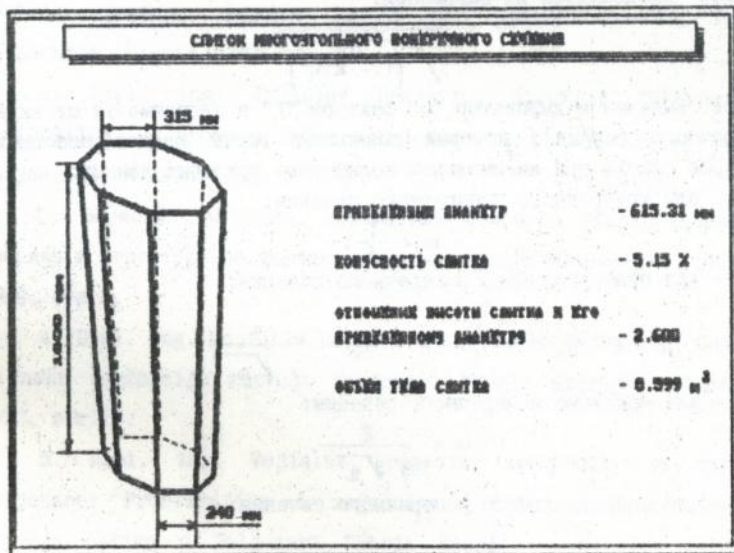


Рис. 2

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана и исследована модель расчета основных параметров слитка, которая представлена в двух видах:

- обобщенная (сжатая) форма модели;
- форма модели для различных сечений слитка.

2. Для разработки модели расчета основных размеров слитка, с учетом регулирования его кристаллизации, взяты определяющие характеристики слитка: конусность его граней и отношение высоты к приведенному диаметру. Эти параметры оказывают определяющее влияние на расчет. При этом приведенный диаметр представляет собой квадратный корень из приведенной площади сечения:

$$D_{\text{пр}} = \sqrt{F_{\text{пр}}} = \sqrt{\frac{F_{\text{макс}} + F_{\text{мин}}}{2}}$$

3. Определен и исследован фактор "f" отношения приведенного диаметра к квадратному корню из площади среднего сечения слитка, который определяется из выражения:

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \eta^2}}$$

4. Введен модификатор "ω" фактора "f" в зависимости от вида поперечного сечения, который позволяет вести расчет основных размеров слитка при минимальном количестве исходных данных:

- для квадратного поперечного сечения:

$$\omega = \frac{1}{f};$$

- для прямоугольного поперечного сечения:

$$\omega_a = \frac{\sqrt{\rho}}{f}, \quad \omega_b = \frac{1}{f \sqrt{\rho}}$$

- для круглого поперечного сечения:

$$\omega = \frac{2}{f \sqrt{\pi}}$$

- для многоугольного поперечного сечения:

$$\omega = \frac{2}{f \sqrt{n_s \text{ctg} \alpha}}$$

5. Разработан общий алгоритм математической модели для расчета основных размеров слитка.

6. С применением математической модели возможно вести расчет основных размеров слитка при минимальном количестве входных данных, которыми могут быть металлургические характеристики (κ и η) и один из физических размеров ($G, V, a_{\text{макс}}, a_{\text{мин}}, H$).

7. Проиллюстрирована работа алгоритма модели на конкретном примере проектирования слитка.

8. Экономический эффект от использования результатов диссертационной работы составляет 600 млн. динаров в год. Доля экономического эффекта автора составляет 40% от суммы годового экономического эффекта или 240 млн. динаров в год.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, upravnik Teske valjaonice: Predlog rjesenja zagreva ingota na Potisnim pecima Teske valjaonice, Niksic 1960. str.27.

2. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, direktor valjaonica: Racionalizacija procesa tehnologije zagreva i valjanja na Teske valjaonici, Niksic 1963. str.96.

3. Војислав Драгович, металуршки инжењер: Утицај примарне прераде и структуре на особине умирених усвеничних челика, Никшич 1968, стр.2.

4. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, savjetnik za razvoj: Csvit na neke tendencije razvoja Zeljezare "Boris Kidric" - Niksic, 1970, str.17.

5. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, savjetnik za razvoj Zeljezare: Problematika i mogucnost primje ne kontinuiranog livenja celika u Zeljezari "Boris Kidric" - Niksic, studija 1/71, sifra 2.801.104.249.07., Niksic 1971, str.27.

6. Vojislav P. Dragovic: Smjernice razvoja Zeljezare "Boris Kidric", "Celik" №42, Beograd 1973, str.10.

7. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, savjetnik za razvoj Zeljezare: Priprema tenderske dokumentacije za bluming 850 mm "Boris Kidric" - Niksic, studija br 4/74, sifra 2.801.123.164.07, Niksic 1974, str.8.

8. Dipl. ing. Vojislav Dragovic, sef Projekta modernizacije Zeljezare: Model fabrike plemenitih celika sa izrazenom metalopreradom, studija br 8/75, sifra 2.801.123.171.07, Niksic juna 1975, str.38.

9. Vojislav P. Dragovic, glavni inzenijer MPK Zeljezare "BK" Niksic: Opravdanost paralelnog rada Bluminga i uređaja za kontinuirano livenje celika, "Celik" br 77, Beograd 1979.

10. Vojislav P. Dragovic, glavni inzenijer MPK Zeljezare "BK" Niksic: Primarni znacaj kvaliteta polufabrikata kod proizvodnje plemenitih celika, "Rudarstvo, Geologija i Metalurgija" 1980., br 1., str 6.

11. Vojislav P. Dragovic, dipl. ing.: Proizvodnja i prerada celicne zice u SR Crnoj Gori do 2000 god, Niksic juna, 1986.

12. Драгович В., Шевченко В.П. и Тищенко П.И. Разработка способа расчета основных параметров стального слитка/ Дон. гос. техн. ун-т.- Донецк, 1994.- Деп. в ГНТБ Украины.

Попап. в печать 2.04.94 Формат 60×84^{1/16}. Бумата *типогр.* Офсетная печать.
Усл. печ. л. 1,63 . Усл. кр.-отт. 1,86 . Уч.-изд. л. 1,55 , Тираж 120 экз.
Заказ № 9-718 Бесплатно.

Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМНП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

162403

AB 29.79

AB 29.797