

Бетень Г.Ф., кандидат технических наук, доцент;
Анискович Г.И., кандидат технических наук, доцент
*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет»*

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНОГО ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТЬЮ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ

Аннотация. В статье приведены сведения о реализации технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью в производственных условиях и технологическом оснащении термических производств.

Ключевые слова. Закалочное охлаждение, ремонтные заготовки, закалочное устройство, технологический модуль, твердость, прочность, ударная вязкость, ресурс, структурное строение.

Annotation. The article presents data on the implementation of the pulse quenching liquid cooling technology in a production environment and the technological equipment of thermal plants.

Keywords. Hardening cooling, repair workpiece, hardening device, technological module, hardness, strength, impact toughness, resource, structural composition.

Введение. Современный этап перевода экономики металлопотребляющих производств, к которым относятся сельхозмашиностроение и ремонтно-обслуживающие предприятия АПК, на инновационный путь развития требует проведения их глубокой технологической модернизации. В наибольшей мере это касается термических производств [1, 2, 3]. До настоящего времени на этих производствах преобладали традиционные закалочные методы (закалка с охлаждением стальных заготовок погружением в воду или масло). На протяжении многих десятилетий в совершенствование технологии закалочного охлаждения не вносилось сколь заметных новшеств, направленных на повышение качества и конкурентности металлопродукции, упрочняемой закалкой.

Актуальность проведения широкомасштабной технологической модернизации термических производств подтверждается назревшей необходимостью освоения отечественного наукоемкого производства сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин (ДРОМ), не уступающих по техническому уровню лучшим мировым аналогам. Она должна сопровождаться сменой традиционных подходов на применение новых конструкционных сталей повышенной эксплуатационной надежности, при производстве и упрочнении которых реализуются элементы нанотехнологий [4, 5, 6, 7]. Ресурсы повышения физико-механических и эксплуатационных свойств традиционными подходами (легирование, химико-термическая обработка, традиционная закалка охлаждением погружением в охлаждающую среду и другие методы без существенного изменения размера характерного структурного элемента) по сути исчерпаны. Это стимулирует разработку научных направлений с использованием элементов нанотехнологий для решения проблемы на основе одновременного сочетания высокой прочности, твердости, вязкости, пластичности и износостойкости [8, 9]

К настоящему времени отставание в области производства сменных ДРОМ, не уступающих по техническому уровню зарубежным аналогам сокращается. Примером технического решения проблемы освоения отечественного производства конкурентоспособной продукции (сменных ДРОМ) является использование технических решений [10, 11, 12] и технологии импульсного закалочного охлаждения потоком воды или водного раствора кальцинированной соды (ТИЗОЖ) [4, 13, 14]. Данная технология является свидетельством актуальности и научной новизны технических решений применительно к сменным деталям рабочих органов сельскохозяйственной техники, созданных специалистами БГАТУ. Она прошла проверку в производственных условиях уже на целом ряде предприятий республики [14]. ТИЗОЖ является объектом конструкторской [11, 12] и опытно-технологической разработки [14] с высокой степенью завершенности.

Технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью (ТИЗОЖ) является отечественной, обладает патентной чистотой и защищенностью [10, 11, 12], энерго- ресурсо- и природосберегающей, высокой производительностью около 600 изделий в смену и лимитируется пропускной способностью

нагревательной печи. Основным классификационным признаком ТИЗОЖ является отнесение её к нанотехнологии, так как с её реализацией при заданных режимах и их параметрах в изделиях из конструкционной стали формируется наноструктурированное состояние, характеризующееся размером характерного структурного элемента в диапазоне 30...80 нм [17]. В зарубежной практике аналогом такого технического решения наиболее распространенной является технология под названием «Conit» (интеллектуальная собственность норвежской фирмы «Kverneland») [18]. В работе [19] сообщается о получении стальных заготовок с размером структурных элементов не более 40 нм.

Основная часть. По аналогии с традиционными методами термической обработки ТИЗОЖ включает три основных этапа: нагрев; изотермическую выдержку; охлаждение заготовок в заданных параметрах этих режимов.

В производственных условиях для нагрева стальных ремонтных заготовок (РЗ) используются печи сопротивления камерного типа. Для мелких РЗ (долото, нож измельчителя, нож косилки) применяются нагревательные печи типа ПКМ 3.6.2/11 мощностью 12 кВт. РЗ среднего размера (диск сошника, грудь отвала, стрельчатая лапа) рекомендуется нагревать в печах типа СНО 4.8.3/11. Мощность такой печи составляет 18 кВт. Для нагрева крупных РЗ (диски луцильников и дискаторов, полевые доски, лемехи) в производственных условиях апробированы нагревательные печи типа СНО 8.8.4/11. Мощность этого типа печей может составлять 35 – 70 кВт.

Число нагревательных печей (НП) рекомендуется уточнять с учетом годовой производственной программы, размеров и массы РЗ (толщина ДРОМ составляет 4 – 14 мм), продолжительности нагрева и массы РЗ одной садки.

Современные нагревательные печи типа ПКМ, СНО, СНОЛ комплектуются микропроцессорными контроллерами по аналогии с «ТЕРМОДАТ». Точность измерения нагрева РЗ обеспечивается $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

В соответствии с технологической схемой ТИЗОЖ, нагретая до температуры аустенитизации стальная ремонтная заготовка устанавливается в устройство закалочного охлаждения [12] и фиксируется. После этого в зазоры между РЗ и ограждающими поверхностями, формируемыми матрицей и пуансоном закалочного устройства, подается быстродвижущийся поток

охлаждающей жидкости (ОЖ). Температура и скорость потока ОЖ задается в определенном интервале. В производственных условиях апробированы ряд сменных устройств закалочного (УЗО) высокоинтенсивного охлаждения жидкостью (к настоящему времени используется около 20 типов конструкций УЗО). Они имеют, как правило, индивидуальное назначение. Основными конструктивными элементами УЗО являются матрица и пуансон [12]. Для сложнопрофильных РЗ (лемех, сферический диск и др.) матрица и пуансон изготавливаются на копировально-фрезерных станках с ЧПУ по чертежам, выполненным в трехмерном изображении. Апробированы различные варианты фиксации УЗО с применением винтовых устройств, пневматических и гидравлических приводов

Устройства закалочного охлаждения разрабатывается для каждого типоразмера деталей индивидуально. Оно является сменяемым блоком технологического модуля (ТМ) [11]. Функционирование взаимосвязанных технических средств ТМ позволяет охлаждать детали при их закалке с учетом требуемой критической скорости охлаждения, регламентируемой для данной марки стали, со скоростью от $400^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $5000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и более. Продолжительность цикла охлаждения изменяется в зависимости от формы, марки материала РЗ и требований предъявляемых к детали в эксплуатации. Она не превышает 3 – 5 с (регламентируется реле времени с интервалом 0,1 с)

ТМ для реализации ТИЗОЖ состоит из комплектующих отечественного производства. В производственных условиях реализованы два варианта ТМ. В одном случае работа ТМ осуществляется с использованием системы оборотного водоснабжения предприятия (реализовано на ОАО «КЗТШ» и ОАО «Дрогичинский ТРЗ»). Второй вариант ТМ включает автономную систему водоснабжения. В этом случае создаются отдельные емкости для воды объемом от 5 до 15 м^3 . ОЖ циркулирует по замкнутому контуру (реализовано на ОАО «Минский Агросервис», ОАО «Витебский МРЗ», ПРУП «МЗШ», ТНПЦ БГАТУ).

С учетом накопленного опыта использования ТИЗОЖ в производственных условиях, установлено, что температура ОЖ на входе в УЗО может находиться в интервале 278 – 303К. При удельном расходе ОЖ в случае двухстороннего охлаждения РЗ не менее $200\text{ л}/\text{с}\cdot\text{м}^2$, температура ОЖ на выходе из УЗО повышается не более 10 К, что не приводит к ухудшению условий труда. С

помощью блока управления расходом ОЖ в конструкции ТМ обеспечиваются условия реализации остаточной температуры для РЗ одинаковой толщины в интервале 433 – 473 К с целью обеспечения самоотпуска.

Твердость закаленной поверхности РЗ достигается при соблюдении основного параметра закалочного устройства – расхода охлаждающей жидкости (воды) в интервале её подогрева (Δt) от 5°С до 15°С) при охлаждении заготовки в потоке воды. Изменение расхода (Q , л) охлаждающей жидкости для указанных условий охлаждения заготовок из стали 60ПП, 30ХГСА представлено графически (рисунок 1).

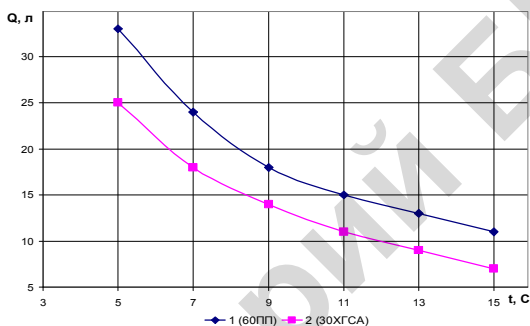


Рисунок 1 – Изменение расхода охлаждающей жидкости (Q , л) от температуры её подогрева при охлаждении стальной заготовки толщиной 8мм (масса 1 кг.) в потоке воды при избыточном давлении 0,40 МПа. 1 – заготовка из стали 60ПП; 2 – заготовка из стали 30ХГСА.

Плотность орошения является одним из параметров ТИЗОЖ. В каждом конкретном варианте применения ТИЗОЖ следует уточнять плотность орошения Q стальной РЗ площади внешней охлаждаемой поверхности S_1 из соотношения

$$Q = \frac{M_1}{S_1 \cdot \tau_o},$$

где M_1 – объем охлаждающей жидкости на охлаждение одной стальной РЗ, л;

τ_o – продолжительность цикла охлаждения, с

Расчетные численные значения параметра Q должны быть не менее 200 л/м² · с.

ТИЗОЖ является ОК и ОТР с высокой степенью завершенности. Она реализована на ряде предприятий Минпрома РБ и РО «Белагросервис»: на ОАО «КЗТШ» (г. Жодино) при производстве лемехов (рисунок 2 а), на РУП «МЗШ» при производстве долот плугов, на ОАО «БЭМЗ» при производстве дисков (рисунок 2 е, ж) и других деталей, на ТНПЦ БГАТУ при закалке широкой номенклатуры сменных ДРОМ, на ОАО «Дрогичинский ТРЗ» при производстве долот (рисунок 2 б). Совместно с КУПП «Березарайагросервис» освоено изготовление ножей измельчителей кормоуборочных комбайнов «Ягуар-840» (рисунок 2 и). В настоящее время осуществляется авторский надзор и сопровождение работ по освоению ТИЗОЖ на ОАО «Минский Агросервис» при изготовлении дисков сеялок, ножей роторных косилок, полевых досок (рисунок 2 в) ножей измельчающих аппаратов, ножей жаток кормоуборочных комбайнов (рисунок 2 г), деталей рабочих органов глубокорыхлителей (рисунок 2 д) и других деталей, на ОАО «Витебский МРЗ» при производстве дисков сошников сеялок (рисунок 2 к) и дисков дискаторов (рисунок 2 л). В 2014-2015 г.г. освоено изготовление продукции этими предприятиями с использованием ТИЗОЖ на сумму 6,23 млрд. рублей.



Рисунок 2 – Сменные ДРОМ, изготовленные с применением ТИЗОЖ на предприятиях: а – ОАО «КЗТШ» (г. Жодино); б – ОАО «Дрогичинский ТРЗ»; в, г, д – ОАО «Минский Агросервис»; е, ж, – ОАО «Брестский ЭМЗ»; и – КУПП «Березарайагросервис»; к, л – ОАО «Витебский МРЗ».

Привлекательность потребителей к технологии ИЗОЖ для упрочнения сменных ДРОМ заключается в том, что она является

отечественной технологией, обеспечивающей высокое качество изделий, надежность и стабильность процесса, а применение сменных закалочных устройств УЗО в составе технологического модуля для закалки деталей различной конструкции и размеров обеспечивает гибкость и экономичность производства. На рисунке 3 представлен общий вид термического участка, введенного в эксплуатацию в 2014 году на ОАО «Витебский МРЗ», на котором с применением ТИЗОЖ упрочняется широкая номенклатура деталей рабочих органов машин. В текущем году продолжают работы по освоению упрочнения дисков роторов и башмаков брусьев косилок с использованием ТИЗОЖ в Холдинговой компании «Бобруйскагроماش».



Рисунок 3 – Общий вид термического участка ТИЗОЖ, введенного в эксплуатацию на ОАО «Витебский МРЗ» в 2014 г.

Сменные ДРОМ, изготовленные с применением ТИЗОЖ, характеризуются высокой работоспособностью, без использования дорогостоящих легированных сталей. В упрочненных деталях из стали 55 ПП и 60 ПП при достаточно высокой твердости (56...62 HRC) и прочности (σ_b более 2000 МПа) сохраняется повышенная ударная вязкость (K_{SU} не менее 0,6 МДж/м²). Ресурс сменных ДРОМ нового поколения в 2 и более раза выше по сравнению с изделиями, изготовленными по традиционной технологии с использованием стали 65 Г. В зарубежной практике такими свойствами обладают сменные ДРОМ, изготовленные из легированных сталей.

Приемочные испытания сменных ДРОМ (рисунок 4) проводились на объектах ГУ «Белорусская МИС». Оценка ресурса изделий проводилась согласно СТБ 1616-2011. Соответствие техническим требованиям к устойчивости деталей к абразивному изнашиванию и пластической деформации изделий выполнялось в соответствии с ТКП 572-2015.



Рисунок 4 – Испытания дисков в эксплуатационных условиях

В ходе приемочных испытаний сферических дисков установлены следующие показатели. Численные значения твердости (HRC) материала испытываемых дисков находятся в интервале 50 – 52 HRC (495 – 514 HB).

Численные значения прочности (σ_s) испытываемых дисков определены аналитически с учетом корреляционной связи между временным сопротивлением и числом твердости (HB) из соотношения $\sigma_s = 3,4 HB$ и составили 1683 – 1748 МПа. Это превышает регламентированный норматив [20].

Значения ударной вязкости (KSU) находится в интервале 61,8 – 85,6 Дж/см². Интенсивность абразивного изнашивания дисков, отнесенная к площади трения 1см², составляла 18,94 г/га. При запасе на линейный (массовый) износ до диаметра 540 мм (около 80 – 85 мм по диаметру) или по массе 1550 – 1650 г, ресурс дисков составляет в пределах 40,9 – 43,5 га.

В таблице 1 приведены результаты испытаний дисков и их оценка согласно установленным нормативам, регламентированных СТБ1616-2011 и ТКП 572-2015.

Таблица 1 – Результаты испытаний материала (сталь 35) сферических дисков (диаметр 620 мм)

Показатели	HRC (HB)	σ_b , МПа	KSU, Дж/см ²	ϵ	Ресурс, га
Результаты испытаний	50-52 (495-514)	1683-1748	61,8-85,6	2,7	40,9-43,5
Норматив:					
по ТКП 572-2015	не менее 50	не менее 1500	не менее 60	для эталона 1,0	-
по СТБ 1616-2011	-	-	-	-	не менее 40

Основным конкурентным преимуществом сменных ДРОМ, полученных с применением ТИЗОЖ, является их наноструктурное строение с размером характерного структурного элемента в диапазоне около 30 – 80 нм. Формирование наноструктурного состояния изделий обеспечивается с использованием нелегированных конструкционных сталей. Это выгодно их отличает в сравнении с зарубежными изделиями, изготовленными из боросодержащих мало- и среднеуглеродистых сталей с легирующими добавками молибдена, титана и других элементов.

Изучение микроструктурного строения упрочненных деталей (сталь 60ПП) показало, что в поверхностном слое (рисунок 5а) образовалась микроструктура весьма мелко игольчатого мартенсита, по оценке металлографическим методом (ГОСТ 8233) наибольшая длина игл которого составляет до 1 мкм.

При увеличении соответственно $\times 50\ 000$ и $\times 80\ 000$ (рисунок 6) выявлена фрагментация (дробление) мартенситных пластин. Их размер в поперечном сечении составляет 50 – 100 нм, а размер фасеток отдельных пластин мартенсита находится в пределах 20 – 80 нм.

На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрозерен. Края мартенситных пластин и фрагментов частично размыты, что говорит об их аморфно-кристаллическом состоянии.

Снимки микроструктуры троостита в сердцевине плоского образца (рисунок 5 б) также свидетельствуют о его дисперсности [23]. В поперечном сечении размеры фрагментов троостита составляют 20 – 60 нм, а длина трооститных пластин находится в пределах 120 – 500 нм (таблица 2).

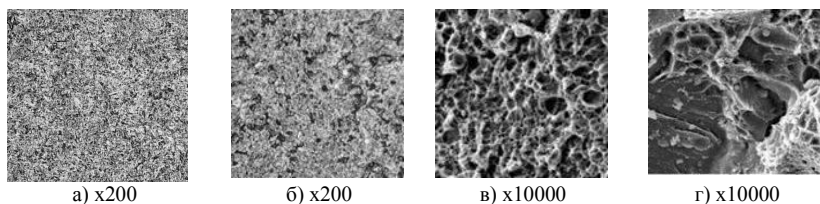


Рисунок 5 – Микроструктура внешних поверхностей (а) и сердцевины (б) и морфология ячеистого излома образца, испытанного на ударный изгиб (в-наружного слоя, г - сердцевины)

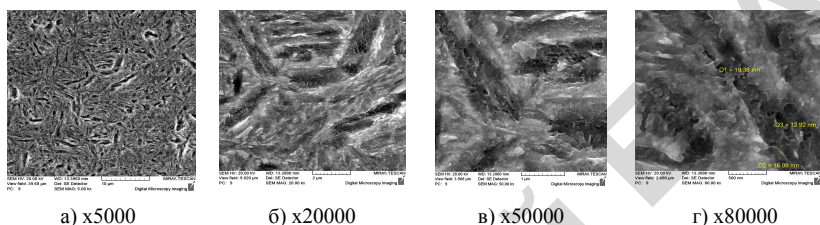


Рисунок 6 – Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщины 8мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска

Статистические данные по средней длине фрагментов мартенситных пластин стали 60ПП после упрочнения рабочей поверхности деталей толщиной 6 – 12мм показали, что размер 80% фрагментов находится в диапазоне 0,02 – 0,08мкм. После низкого отпуска при 180°С размер фрагментов изменяется незначительно, 60% составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02 – 0,06 мкм.

Таблица 2 – Разбиение на классы по длине фрагментов в мартенситных пластинах детали из стали 60ПП после низкого отпуска.

Класс	Количество, штук	Интервал, мкм	Доля по количеству, %	Доля по массе, %
1	0	0 – 0,02	0	0
2	2	0,02 – 0,04	3,08	1,14
3	29	0,04 – 0,06	44,62	30,08
4	26	0,06 – 0,08	40	45,04
5	7	0,08 – 0,1	10,77	20,88
6	1	0,1 – 0,12	1,54	2,85
7	0	0,12 – 0,14	0	0
8	0	0,14 – 0,16	0	0
9	0	0,16 – 0,18	0	0
10	0	0,18 – 0,2	0	0

Реализованные в производственных условиях новые материалы и ТИЗОЖ, позволили обеспечить в изделиях сочетание требуемой прочности, надежности, долговечности и износостойкости сменных ДРОМ нового поколения.

Сменные ДРОМ определяют технический уровень в целом машины. Сменные ДРОМ являются дорогостоящими изделиями. Так, например, цена одного импортного комплекта дисков (48 шт.) на один дискатор составляет от 20,0 млн. руб. до 30 млн. руб., цена одного комплекта ножей (24 шт.) измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна «Ягуар-840» составляет от 20,0 млн. руб., цена одного комплекта сменных деталей (лемех, долото, полевая доска, грудь и крыло отвала) к корпусу плуга составляет 1.2 млн. руб.

За срок службы, например, почвообрабатывающих машин, с учетом многократной замены сменных ДРОМ, затраты на эти цели превышают первоначальную стоимость сельскохозяйственного орудия. Снижение этих расходов – одна из ключевых задач экономики государства.

Заключение. 1. Результаты практической реализации ТИЗОЖ рядом предприятий республики за последние 5-7 лет свидетельствуют о соответствии этого метода производственным условиям упрочнения сменных ДРОМ по показателям качества, производительности и экономической эффективности. Она успешно реализуется как на ремонтных предприятиях АПК, так и на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения.

2. ТИЗОЖ относится к группе высокоинтенсивных процессов термического воздействия ОЖ на высокотемпературную стальную заготовку при ее охлаждении, обладает коммерческой перспективой и на современном этапе совершенствования термического производства является одним из самых эффективных методов модификации свойств сменных ДРОМ нового поколения.

3. ТИЗОЖ является отечественной, обладает патентной чистотой и защищенностью, энерго- ресурс- и природосберегающей, высокой производительностью. Она реализуется на применении технологического оборудования отечественного производства. Занимаемая площадь производственного помещения составляет 54-72 м².

4. Классификационным признаком ТИЗОЖ является ее отнесение к нанотехнологиям, так как с ее реализацией при заданных режимах и их параметрах в заготовках из конструкционной стали формируется наноструктурированное состояние с размером характерного структурного элемента в диапазоне 30-80 нм.

5. Совершенствование термических производств на основе использования ТИЗОЖ соответствует инновационному пути развития через технологическую модернизацию их базы, что позволяет производить экспортоориентированную продукцию (сменные ДРОМ и др. детали нового поколения).

Список использованной литературы

1. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т.1. – М.: Наука и технологии, 2004. – 392 с.

2. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т.2. – М.: Наука и технологии, 2004. – 608 с.

3. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т.3. – М.: Наука и технологии, 2004. – 704 с.

4. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин/И.Н. Шило [и др.] – Минск: БГАТУ, 2010. – 320с.

5. Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение /под ред. академика Витязя П.А. /– Минск: Беларуская навука, 2009. – 370 с.

6. Горынин, И.В. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях / И. В. Горынин [и др.]/Вопросы материаловедения. – 2008. – №22. – С. 7–19.

7. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин//Физическая мезомеханика. – 2009. - №12. – С. 7-26.

8. Бетень, Г.Ф. Модификация структуры и механических свойств стали пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью / MOTOROL/ – Lublin-Pzeszow // Г.Ф. Бетень, Г.И. Анискович, 2013, vol.15, №7 – С.80-86.

9. Инновационные технологии упрочнения деталей сельскохозяйственной техники / Н.В. Казаровец, Г.Ф. Бетень, Г.И. Анискович, А.И. Гордиенко, В.С. Голубев, А.Н. Давидович//Сборник докладов 12 МНТК 10-12 сентября 2012 г., Углич. – М.: Известия, 2012. – С.219-228.

10. Рабочий орган почвообрабатывающих машин (варианты): Патент на изобретение №7466 РБ / Дашков В.Н., Хилько И.И., Бетень Г. Ф. [и др.]; УО БГАТУ. Оpubл. 28.06.2005//Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў/Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай маёмасці.

11. Технологический модуль для закалки деталей: патент № 2139 РБ / Бетень Г. Ф. [и др.]; УО БГАТУ. Оpubл. 16.05.2005//Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў/Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай маёмасці.

12. Закалочное устройство для быстрого охлаждения тонкостенных заготовок: патент №19291 РБ на изобретение /Бетенья Г.Ф. [и др.] /, 2015.

13. Бетенья, Г.Ф. Упрочнение деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин в условиях импульсного закалочного охлаждения / Г.Ф. Бетенья, А.В. Кривцов // Агропанорама / – 2015, №3. – С. 15-19.

14. Бетенья, Г.Ф. Опыт упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости импульсным закалочным охлаждением жидкостью / Г.Ф. Бетенья, Г.И. Анискович // Вестник БарГУ/ – 2013, вып.1 – С. 152–159.

15. Бетенья, Г.Ф. Объемные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетенья [и др.]//Вестник Полоцкого государственного университета / – 2012, №3, серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 46-51.

16. Landmaschinenwelt 97/98. // Technische Anberungen Vorbehalten, 1997. – 181с.

17. Bulk nanokristalline steel//ironmaking and steelmaking. – 2005. – V.32. – P.1-24.

18. Горынин, И. В. Исследования и разработки ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области конструкционных наноматериалов/И. В. Горынин//Российские нанотехнологии. – 2007. - №3-4. – С. 36-57.

19. Материаловедение: Учебник для вузов / Б. А. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.]; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648с.

20. ТКП 572-2015 (33170). Детали сельскохозяйственных машин, подвергающихся интенсивному износу. Требования к параметрам устойчивости к абразивному, ударно-абразивному изнашиванию и пластической деформации. Минск, Минсельхозпрод, – 2015.

21. Тушинский, Л. И. Структурная теория конструкционной прочности материалов: Монография. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 400 с.

22. Игнатков, Д.А. Приближенная оценка напряженного состояния лезвийной части сферического диска дискатора / Д.А. Игнатков, А.В. Ващула, Г.Ф. Бетенья/ Вестник БарГУ//. – 2015, вып.3. – С. 62-68.

23. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры [Текст.- введ. 1957-07.01. – М.: Изд-во стандартов. 1960. - 4с]

24. ГОСТ 23.208-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы. – М.: Изд-во стандартов. – 8с.