



УДК 620; 621.78

Поступила 06.05.2015

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON RESIDUAL DEFORMATION CHIPPER KNIVES

*А. В. АЛИФАНОВ, В. Н. АЛЕХНОВИЧ, А. М. МИЛЮКОВА, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, В. В. ЦУРАН, Учреждение образования «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь*

*A. V. ALIFANOV, V. N. ALEKHNOVITCH, A. M. MILYUKOVA, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, V. V. TSURAN, Baranivitchi State University, Baranovichi, Belarus*

*Для проведения экспериментальных исследований влияния температурных режимов на остаточную деформацию образцов ножей были изготовлены модельные образцы рубильных ножей из сталей марок 6ХВ2С (базовой), У8А и 9ХФ, каждый из которых по своим размерам полностью соответствует своему аналогу (готовому ножу).*

*Результаты экспериментальных исследований показали, что образцы с небольшими размерами и относительно большой толщиной после термической обработки (ТО) не имеют никаких остаточных деформаций. Образцы, относительно тонкие и имеющие прямоугольную форму (длиной более 300 мм), после ТО имеют остаточную деформацию в виде прогиба. При этом величина прогиба тем больше, чем меньше отношение толщины образца к его длине и ширине. Установлено, что образцы, изготовленные из стали марки 6ХВ2С, имеют величину прогиба, меньшую, чем образцы из стали марок У8А и 9ХФ.*

*В результате проведенных исследований установлено, что остаточная деформация (прогиб) образцов ножей из различных марок сталей (6ХВ2С, 9ХФ, У8А) имеет различную величину и зависит от геометрических параметров ножей (длина, толщина, ширина) и марок сталей. Прогиб легко устраняется путем дополнительной рихтовки.*

*В ходе проведенных работ из стали 6ХВ2С, поставляемой на белорусский рынок из России, на филиале ЗАО «Атлант»-БСЗ было изготовлено несколько комплектов опытных образцов рубильных ножей, предназначенных для испытаний в производственных условиях на деревообрабатывающих предприятиях республики (ОАО «Ивацевичидрев», ОАО «Витебскдрев»).*

*Производственные испытания всех опытных ножей, изготовленных в соответствии с технологическими процессами, разработанными в БарГУ, показали их соответствие производственным требованиям, а также требованиям ГОСТов, что позволяет рекомендовать их для широкого внедрения на деревообрабатывающих предприятиях, специализирующихся на производстве технологической щепы.*

*To carry out experimental studies of the influence of temperature modes on residual deformation of the sample-ing knives were manufactured pilot models of chipper knives 6HV2S steels (basic) and U8A 9HF each in size up to its analog (finished knife). We draw on the modes recommended for these steels.*

*The experimental results showed that the samples with small size and relatively large thickness after THEN do not have any permanent deformations. Samples mens concerning thin and having a rectangular shape (length 300 mm), then there are residual after deformation as Trough. The magnitude of the deflection is greater the smaller the ratio of the thickness of the sample to its length and width. It is found that the samples made from steel 6HV2S have a deflection value smaller than the samples of steel grades and 9HF U8A.*

*Repair any defects in the form of troughs manage curved by heating the samples to the tempering temperature and the subsequent exposure between steel plates in a hydraulic press under a load to cool the workpiece.*

*Thus, as a result of the research found that the residual deformation-tion (trough) samples of knives from different grades (6HV2S, 9HF, U8A) has a different value, depending on the geometrical parameters of knives (length, thickness, width) and grades. The deflection can be easily eliminated by additional straightening.*

*In the course of the work of steel 6HV2S supplied to the Belarusian market of Russia, at the branch of JSC «Atlant» -BSZ it was manufactured a few sets of prototypes chipper knives, intended for testing in a production environment on the woodworking enterprises of the republic (of «Ivatsevichidrev», JSC «Vitebskdrrev»).*

*Production tests of experimental knives made in accordance with the process technology-mi, developed in Barga, showed their compliance with production requirements and also require-ments of state standards, which allows recommend them for a wide introduction to woodworking factories, specializing in the production of wood chips.*

**Ключевые слова.** Рубильные ножи, модельные образцы, режимы термообработки, остаточная деформация, рихтовка, производственные испытания.

**Key words.** Chipping knives, modeling patterns, modes of heat treatment, residual deformation, straightening, production testing.

**Введение.** Организация производства отечественных ножей для рубки щепы на соответствующих предприятиях республики имеет большое практическое значение для деревообрабатывающей промышленности, так как в настоящее время почти вся номенклатура используемых ножей приобретает за рубежом, на что тратятся крупные суммы валютных средств.

В соответствии с поручением Первого заместителя Премьер-министра Республики Беларусь Семашко В. И. (Протокол № 34/12 пр. от 02.06.2012 г.) и приказом Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь № 140 от 26.03.2013 в Физико-техническом институте НАН Беларуси и Барановичском государственном университете разработаны прогрессивные импортозамещающие технологические процессы изготовления ножей для рубки технологической щепы, применяемой в гидролизно-целлюлозно-бумажном и мебельном производствах.

Главным препятствием для организации производства рубильных ножей на белорусских предприятиях является отсутствие необходимых знаний и опыта для проведения качественной термической обработки (ТО) или термомеханической обработки (ТМО) легированных инструментальных сталей, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства изделий (высокие показатели твердости, ударной вязкости, периода стойкости и др.). В литературных и коммерческих источниках сведения о режимах ТО и ТМО, считающихся «ноу-хау», не приводятся. В связи с этим производителям технологической щепы приходится приобретать ножи за рубежом. Задача разработчиков усложняется тем, что различные фирмы-изготовители применяют довольно широкий ассортимент высоколегированных сталей для изготовления ножей, разнообразие которых диктуется еще и различиями ножей по конструкции и размерам.

Большое количество используемых рубильных ножей имеют достаточно большую длину (до 700 мм и более) при относительно небольшой толщине, что создает определенные сложности при термообработке ножей, после которой длинномерные и тонкие ножи приобретают остаточную деформацию.

В данной работе были проведены исследования влияния термообработки на остаточную деформацию различных рубильных ножей, изготавливаемых из разных инструментальных сталей [1].

В связи с тем что процесс изготовления готовых рубильных ножей отличается большой трудоемкостью и соответственно немалой стоимостью, для выполнения поставленной задачи было принято решение изготовить модельные образцы исследуемых рубильных ножей, у которых будут одинаковые с оригиналами габаритные размеры и марки сталей. В некоторых случаях модельные образцы изготавливались в двух экземплярах из альтернативных марок сталей, которые могут быть использованы для получения некоторых рубильных ножей.

После проведения исследования модельных образцов и разработки методов устранения остаточных деформаций были разработаны техпроцессы, изготовлены и испытаны в производственных условиях рубильные ножи длиной 460 и 700 мм.

#### **Исследование влияния термообработки на остаточную деформацию модельных образцов рубильных ножей**

##### ***Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1670 (77×44×15)***

Модельные образцы были изготовлены из сталей 6ХВ2С и У8А с соответствующей этим сталям термообработкой (для стали 6ХВ2С – максимальная температура нагрева – 880 °С, для стали У8А – 800 °С).

Сталь У8А была выбрана в виде альтернативы стали 6ХВ2С из-за ее значительно меньшей стоимости и хороших эксплуатационных характеристик при изготовлении из них режущих элементов для сельскохозяйственной техники.

После осуществления термической обработки модельных образцов в соответствии с требованиями для каждой стали были проведены измерения габаритных размеров образцов, а также отклонение от плоскостности (далее прогиб  $h$ ) их опорных поверхностей с помощью индикатора часового типа, закрепленного на магнитной стойке.

Измерения показали, что после проведенной термической обработки образцов как из стали 6ХВ2С, так и из стали У8А (рис. 1), все измеряемые размеры, а также неплоскостность находятся в допустимых пределах в соответствии с ГОСТ 17342-81 [Ножи для рубительных машин. Технические условия]: разнотолщинность ножа не более 0,1 мм. Неравномерность ширины ножа не более 0,5 мм на всей длине. Допуск прямолинейности режущей кромки и нижней поверхности 0,3 мм на всей длине ножа. Допуск плоскостности передней и опорной поверхностей 0,3 мм на всей длине ножа, но не более 0,1 мм на 100 мм длины. Допуск перпендикулярности торцовых поверхностей ножа относительно нижней поверхности равен допуску на длину ножа.

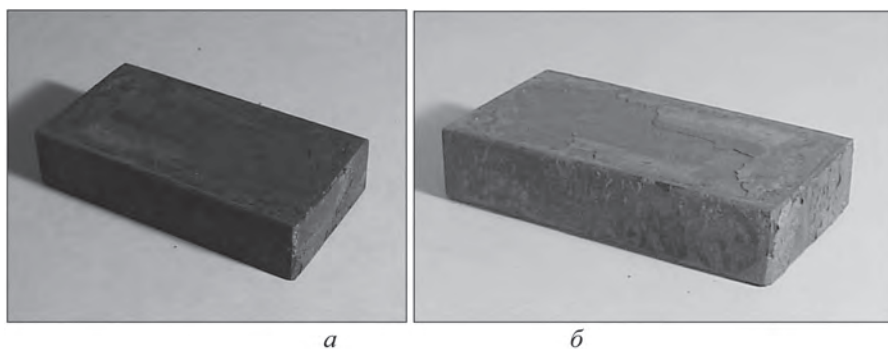


Рис. 1. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1670 (77×44×15):  
а – образец из стали 6ХВ2С после ТО; б – образец из стали У8А после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1671 (460×85×10)**

Для изготовления образцов использовали стали 6ХВ2С и У8А (рис. 2). Температура нагрева составляла для стали 6ХВ2С – 860°С, для стали У8А – 780°С. Величина прогиба  $h$  определяет максимальное отклонение плоскости образца от горизонтали в модельных образцах после термообработки. Прогиб  $h$  у образца из стали 6ХВ2С составил 3,3 мм, а из стали У8А – 1,8 мм. Большее значение величины  $h$  у образца из стали 6ХВ2С объясняется влиянием легирующих элементов, из-за которых при нагреве происходят сложные структурно-фазовые превращения, приводящие к возникновению остаточных напряжений практически ко всему объему образца. Сталь У8А относится к малолегированным сталям пониженной прокаливаемости. Для устранения дефекта в виде прогиба модельные образцы рихтовали: нагревали до температуры отпуска (200 – 220 °С) и под давлением  $P = 15$  т на гидравлическом прессе ПД-476 выдерживали между стальными плитами до полного охлаждения образцов.



а



б

Рис. 2. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1671 (460×85×10):  
а – образец из стали 6ХВ2С до ТО; б – образец из стали 6ХВ2С после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1672 (40×40×23)**

Модельные образцы были изготовлены из стали марок 6ХВ2С и У8А (рис. 3) с соответствующей этим сталям термообработкой (для стали 6ХВ2С – температура нагрева – 880 °С, для стали У8А – 800 °С). Измерения габаритных размеров и неплоскостности образцов после термообработки показали их соответствие требованиям чертежа ФТИ 5.001.1672.

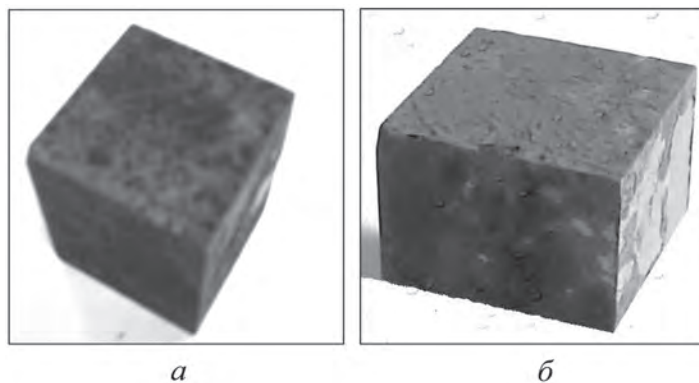


Рис. 3. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1672 (40×40×23):  
а – образец из стали 6ХВ2С после ТО; б – образец из стали У8А после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1673 (300×120×14)**

Для изготовления модельных образцов ножа применяли стали 6ХВ2С и У8А. Температура нагрева для образца из стали 6ХВ2С составляла 880 °С, а для образца из стали У8А – 780 °С.

После термообработки в модельных образцах так же, как и в случае ножа ФТИ 5.001.1671, была обнаружена остаточная деформация в виде прогиба. Величина прогиба  $h$  составила для стали 6ХВ2С – 1,5 мм (рис. 4, б), а для стали У8А – 3,0 мм (рис. 4, в).

Для устранения дефекта в виде прогиба модельные образцы нагревали до температуры отпуска (200–220 °С) и выдерживали под давлением  $P = 10$  т на гидравлическом прессе ПД-476 между стальными плитами до полного охлаждения образцов.

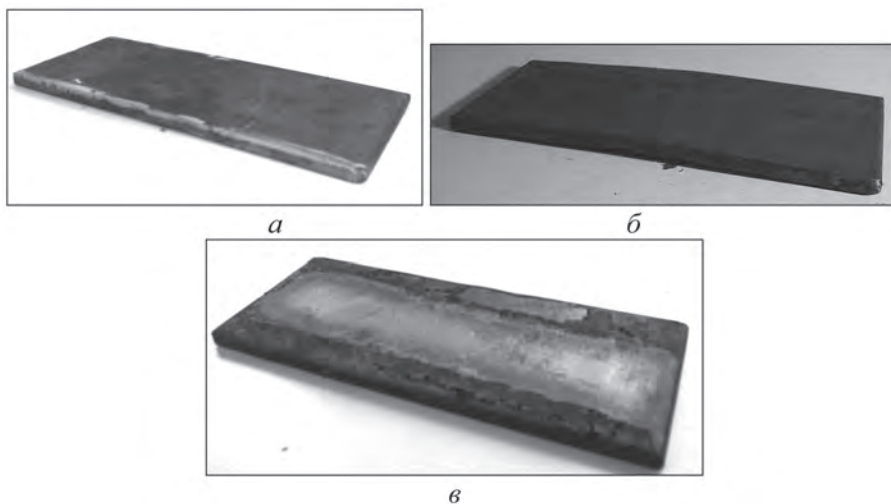


Рис. 4. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1673 (300×120×14):  
а – образец из стали 6ХВ2С до ТО; б – образец из стали 6ХВ2С после ТО; в – образец из стали У8А после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1674 (300×85×6) (рис. 5)**

Для изготовления модельных образцов выбраны стали 6ХВ2С и 9ХФ.

Сталь 9ХФ применяется для изготовления некоторых почворезущих элементов сельскохозяйственных машин и проявляет устойчивость к ударным нагрузкам, отличается невысокой стоимостью и поэтому выбрана в качестве альтернативы стали 6ХВ2С.

Для образцов из стали 9ХФ с учетом их небольшой толщины (6 мм) температура нагрева составила 850 °С. Для образцов из стали 6ХВ2С из тех же соображений (малая толщина) температура нагрева выбиралась по минимально рекомендуемой для этой стали – 860 °С. После термической обработки в модельных образцах обнаружилась остаточная деформация в виде прогиба. Величина  $h$  прогиба составила для стали 6ХВ2С – 2,8 мм, а для стали 9ХФ – 4,3 мм.



*a*

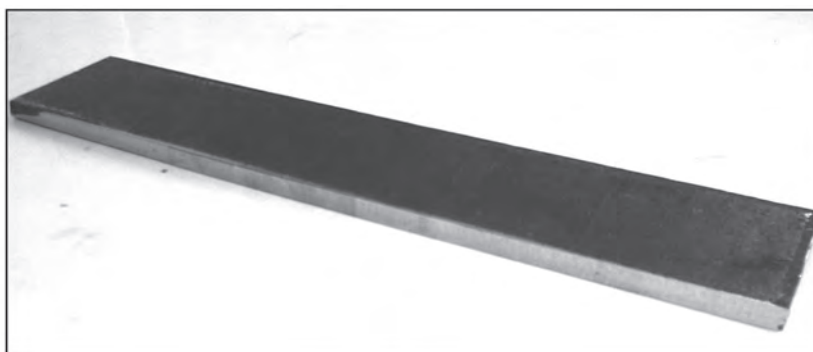


*б*

Рис. 5. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1674 (300×85×6):  
*a* – образец из стали 6ХВ2С до ТО; *б* – образец из стали 6ХВ2С после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1675 (700×92×20)**

Для изготовления модельного образца использовали только сталь 6ХВ2С (рис. 6). Температура нагрева составляла 900 °С. Величина прогиба *h* после термообработки составила 4 мм.



*a*



*б*

Рис. 6. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1675 (700×92×20):  
*a* – образец из стали 6ХВ2С до ТО; *б* – образец из стали 6ХВ2С после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1676 (408×130×15) (рис. 7)**

Для изготовления модельных образцов использовали стали 6ХВ2С и У8А с соответствующими температурами нагрева.

После термообработки в модельных образцах образовался прогиб: для стали 6ХВ2С  $h = 1,5$  мм, а для стали У8А  $h = 2,0$  мм.

*а**б*

Рис. 7. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1676 (408×130×15):  
*а* – образец из стали 6ХВ2С до ТО; *б* – образец из стали 6ХВ2С после ТО

**Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1677 (40×30×15)**

Для изготовления модельных образцов (рис. 8), так же, как и в предыдущем случае, использовали стали 6ХВ2С и У8А с соответствующими температурами нагрева.

Измерения габаритных размеров и прогиба образцов после термообработки показали их соответствие требованиям чертежа ФТИ 5.001.1677.

Результаты экспериментальных исследований показали, что образцы с небольшими размерами и относительно большой толщиной после ТО не имеют никаких остаточных деформаций. Образцы, относительно тонкие и имеющие прямоугольную форму (длиной более 300 мм), после ТО имеют остаточную деформацию в виде прогиба. При этом величина прогиба тем больше, чем меньше отношение толщины образца к его длине и ширине. Установлено, что образцы, изготовленные из стали марки 6ХВ2С, имеют величину прогиба меньшую, чем образцы из стали марок У8А и 9ХФ.

Устранить выявленные дефекты в виде прогибов удастся путем разогрева искривленных образцов до температуры отпуска и последующей выдержкой между стальными плитами на гидравлическом прессе под нагрузкой до остывания заготовки.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что остаточная деформация (прогиб) образцов ножей из различных марок сталей (6ХВ2С, 9ХФ, У8А) имеет различную величину и зависит от геометрических параметров ножей (длина, толщина, ширина) и марок сталей. Прогиб легко устраняется путем дополнительной рихтовки.

**Производственные испытания опытных партий рубильных ножей**

С использованием результатов исследований модельных образцов рубильных ножей были разработаны конструкции и технологии изготовления рубильных ножей ФТИ 5.001.1671 длиной 460 мм и ФТИ

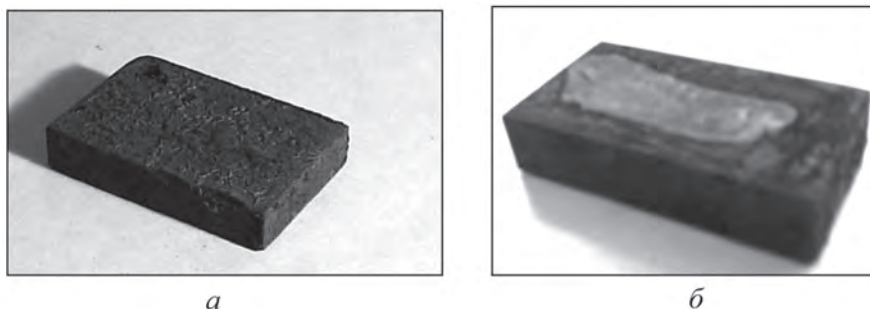


Рис. 8. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1677 (40×30×15): а – образец из стали 6ХВ2С; б – образец из стали У8А после ТО

5.001.1675 длиной 700 мм, которые были изготовлены на филиале ЗАО «Атлант»- БСЗ и затем были проведены их производственные испытания.

#### **Основные требования к проведению производственных испытаний**

Рубильные ножи, изготавливаемые для проведения испытаний, должны соответствовать ГОСТ 17342–81. Перед проведением испытаний древесное сырье тщательно проверяется на отсутствие минеральных, металлических и других включений. Через каждые 2 часа работы необходимо проводить контроль состояния рубильных ножей на наличие трещин, забоин, сколов, замеры величины износа режущей кромки (радиуса режущей кромки по всей длине не менее, чем в трех сечениях методом слепков). В результате испытаний рубильные ножи должны обеспечивать получение технологической щепы, соответствующей ГОСТ 15815–83 [Щепа технологическая. Технические условия]. Установленный период стойкости ножей при переработке окоренной древесины хвойных пород без металлических и минеральных включений влажностью не ниже 50% при температуре не ниже – 10 °С должен составлять не менее 360 мин. Процесс рубки щепы ведется до затупления режущей кромки ножей. По мере затупления весь комплект ножей демонтируется и подвергается перезаточке в цехе предприятия. Результаты испытаний ножей (отработанное время до очередной перезаточки, радиус изношенной режущей кромки) необходимо занести в протокол, где учитывается и количество переработанной древесины.

#### **Производственные испытания рубильных ножей на ОАО «Ивацевичдрев»**

В соответствии с договором № 2012/117 от 07.06.2013 г. на ОАО «Ивацевичдрев» были проведены производственные испытания опытных образцов ножей мод. ФТИ5.001.1671 длиной 460 мм, ТД на которые разработал БарГУ, а изготовил филиал ЗАО «Атлант» – БСЗ (рис. 9).

Испытания проводили в цехе рубки щепы по программе и методике ФТИ 0.316 ПМ «Ножи для рубки щепы». Условия проведения испытаний приведены выше.

В результате испытаний ножи обеспечили получение технологической щепы по ГОСТ 15815–83, период стойкости при переработке окоренной древесины хвойных пород (сосны) без металлических и минеральных включений влажностью не ниже 50% при температуре не ниже –10 °С составил 480 мин. Рубка велась до затупления режущей кромки ножа.

По мере затупления ножей весь комплект демонтировали и подвергали переточке в цехе предприятия. Переточка ножей (демонтаж ножей) включает наладку заточного оборудования, контроль режимов заточки, контроль точности установки ножей на рубильную машину. Было произведено пять перезаточек.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные ножи к использованию на деревообрабатывающих предприятиях, производящих технологическую щепу.

#### **Испытания ножей для рубильных машин на ОАО «Витебскдрев»**

В соответствии с договором с ОАО «Витебскдрев» № 2013/118 от 28.06.2013 г. проведены испытания опытных образцов ножей ФТИ5.001.1675 длиной 700 мм (один комплект) для рубильной машины МРН-100 (Россия), которые были изготовлены на филиале ЗАО «Атлант»-БСЗ (рис. 10).

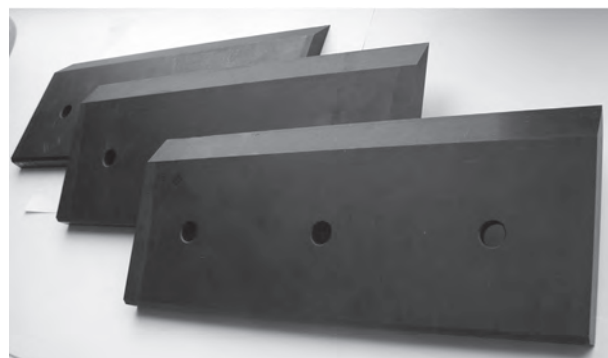


Рис. 9. Опытный образец ножа для рубки щепы ФТИ5.001.1671

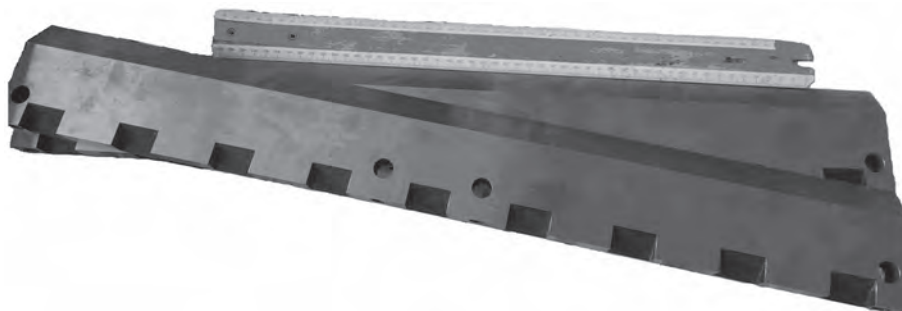


Рис. 10. Ножи для рубки щепы ФТИ5.001.1675

В результате испытаний ножи обеспечили получение технологической щепы по ГОСТ 15815-83, период стойкости при переработке древесины хвойных (сосна) составил 440 мин. Рубка велась до затупления режущей кромки ножа или выхода из строя контрножа.

По мере затупления ножей весь комплект демонтировали и подвергали перезаточке в инструментальном цехе предприятия. Произведено семь перезаточек.

Результаты испытаний также позволяют рекомендовать опытные ножи ФТИ5.001.1675 к использованию на соответствующих деревообрабатывающих предприятиях.

**Исследования механических свойств ножей для рубительных машин после проведения предварительных испытаний**

Из испытанных образцов ножей методом электроэрозионной резки были вырезаны специальные образцы с целью изготовления шлифов для металлографических и дюраметрических исследований. Исследования механических свойств образцов (твердость, ударная вязкость) проводили по стандартным методикам [ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу, ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах].

Известно, что достаточная вязкость в сочетании с достаточно высокой твердостью предупреждает образование сколов (выкрашивания) и трещин. Наряду с определенными внешними факторами на вязкость сталей влияет множество внутренних факторов: химический состав, загрязняющие примесные компоненты, количество и качество включений, степень пластической деформации, величина зерен аустенита, количество, распределение, дисперсность карбидов и других фаз, внутренние напряжения. Это значит, что на вязкость сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, важное влияние оказывают технология их изготовления, а также способ выплавки и горячего деформирования.

Исследованы механические свойства образцов ножей для рубки щепы (твердость, ударная вязкость) по стандартным методикам (ГОСТ 9013–59, 9454–78). Результаты приведены в таблице.

**Механические свойства образцов ножей для рубки щепы**

Номер ножа	Твердость HRC		Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
	до испытаний	после испытаний	до испытаний	после испытаний
ФТИ 5.001.1671	49–55	50–56	12–19	15–23
ФТИ 5.001.1675	50–54	52–56	13–17	16–20

Из таблицы видно, что величины твердости и ударной вязкости опытных образцов ножей после проведения производственных испытаний немного увеличились, что можно объяснить проявлением наклепа в результате многократных ударных нагрузок.

**Выводы**

Для проведения экспериментальных исследований влияния температурных режимов на остаточную деформацию образцов ножей были изготовлены модельные образцы рубильных ножей из сталей марок 6ХВ2С (базовой), У8А и 9ХФ, каждый из которых по своим размерам полностью соответствует своему аналогу (готовому ножу). Термическая обработка (ТО) проведена по режимам, рекомендованным для этих сталей.

Результаты экспериментальных исследований показали, что образцы с небольшими размерами и относительно большой толщиной после ТО не имеют никаких остаточных деформаций. Образцы, относи-



тельно тонкие и имеющие прямоугольную форму (длиной более 300 мм), после ТО имеют остаточную деформацию в виде прогиба. При этом величина прогиба тем больше, чем меньше отношение толщины образца к его длине и ширине. Установлено, что образцы, изготовленные из стали марки 6ХВ2С, имеют величину прогиба меньшую, чем образцы из стали марок У8А и 9ХФ.

Устранить выявленные дефекты в виде прогибов удается путем разогрева искривленных образцов до температуры отпуска и последующей выдержки между стальными плитами на гидравлическом прессе под нагрузкой до остывания заготовки.

В результате проведенных исследований установлено, что остаточная деформация (прогиб) образцов ножей из различных марок сталей (6ХВ2С, 9ХФ, У8А) имеет различную величину и зависит от геометрических параметров ножей (длина, толщина, ширина) и марок сталей. Прогиб легко устраняется путем дополнительной рихтовки.

Из стали 6ХВ2С, поставляемой на белорусский рынок из России, на филиале ЗАО «Атлант» -БСЗ было изготовлено несколько комплектов опытных образцов рубильных ножей, предназначенных для испытаний в производственных условиях на деревообрабатывающих предприятиях республики (ОАО «Минскдрев», ОАО «Ивацевичдрев», ОАО «Витебскдрев», ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев»).

Производственные испытания всех опытных ножей, изготовленных по технологиям, разработанным в ФТИ НАН Беларуси и БарГУ, показали их соответствие производственным требованиям, а также требованиям ГОСТ, что позволяет рекомендовать их для широкого внедрения на деревообрабатывающих предприятиях, специализирующихся на производстве технологической щепы.

### Литература

1. А л и ф а н о в А. В. Определение оптимальных режимов термической и термомеханической обработки рубильных ножей / А. В. Алифанов, А. М. Милукова, В. В. Цуран // Журн. Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. 2014. Вып. 2. С. 17–22.

### Reserences

1. Alifanov A. V., Miljukova A. M., Suran V. V. Opredelenie optimal'nyh rezhimov termicheskoy i termomechanicheskoy obrabotki rubil'nyh nozhej [Determination of the optimal conditions of thermal and thermomechanical treatment chipper knives]. Zhurnal Vestnik BarGU. Ser. Tehnicheskie nauki – Journal Herald BarGU. Series «Engineering», 2014. pp. 17–22.

### Сведения об авторах

Алифанов Александр Викторович, д-р техн. наук, проф., Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Беларусь, г. Барановичи, ул. Войкова, 21. E-mail: alifanov\_aav@mail.ru.

Милукова Анна Михайловна, канд. техн. наук, Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси, Беларусь, г. Минск, ул. Купревича, 10.

Цуран Владимир Владимирович, аспирант, Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Беларусь, г. Барановичи, ул. Войкова, 21. E-mail: curan85@mail.ru.

### Information about the authors

Alifanov Aleksandr, Doctor of Engineering, Professor, Baranovichi State University, Baranovichi city, 21 Voikova str. E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

Milukova Anna, Ph. D in Engineering, Physical and Technical Institute of Nacional Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 10 Kuprevicha str.

Tsuran Vladimir, Ph. D Candidate, Baranovichi State University, Baranovichi city, 21 Voikova str. E-mail: curan85@mail.ru.