

ние мощности имеет параболический характер. Радиус оказывает более существенное влияние на ее величину, чем угловая скорость. Однако соотношение отдельных составляющих мощности такое же как и в предыдущем случае.

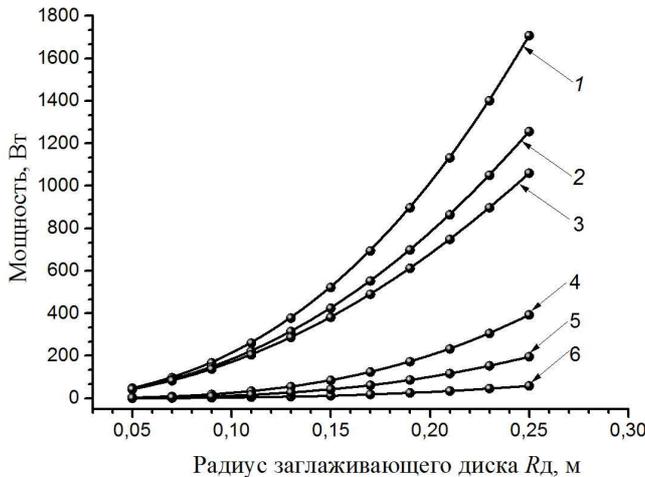


Рисунок 3 – Зависимость мощностей от радиуса заглаживающего диска $R_{д}$
 1 – N_1 ; 2 – $N_{пл}$; 3 – N_1 ; 4 – $N_{ер}$; 5 – N_2 ; 6 – $N_{пс}$

Геометрический критерий k устанавливает соотношение между радиусами приводных элементов заглаживающего диска, а соответственно и угловыми скоростями водила и обкатываемого колеса. Изменение мощности в зависимости от него при постоянных угловой скорости $\Omega = 10$ рад/с и радиуса диска $R_{д} = 0,15$ м показано на рисунке 4.

Здесь, как и в первом случае (рис. 2), мощность и ее составляющие изменяются линейно, хотя геометрический критерий присутствует в них (4) в разных сочетаниях. Правда, видно, что составляющая N_2 , где он отсутствует, остается неизменной. Примечательно то, что варьированием геометрического критерия в диапазоне $k = 1,0 \div 3,0$, можно изменять общую мощность привода примерно вдвое.

Заключение. Таким образом, на основе анализа характера движения дискового рабочего органа заглаживающей машины с плане-

тарным приводом получена расчетная зависимость для определения суммарной мощности на процесс заглаживания и ее отдельных составляющих. Проведен анализ изменения мощности в зависимости от угловой скорости, радиуса заглаживающего диска, геометрических соотношений его привода. Установлено, что наибольшее влияние на затраты мощности оказывает планетарное движение диска. Существенно влиять на них можно за счет варьирования геометрическими соотношениями приводных элементов.

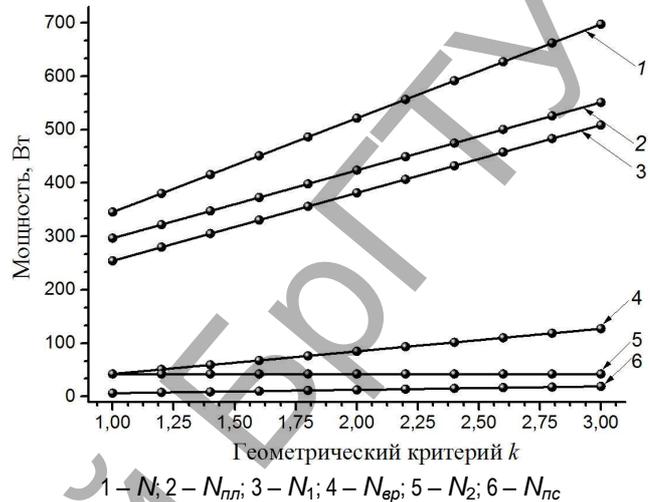


Рисунок 4 – Зависимость мощностей от геометрического критерия k
 1 – N_1 ; 2 – $N_{пл}$; 3 – N_1 ; 4 – $N_{ер}$; 5 – N_2 ; 6 – $N_{пс}$

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болотный, А. А. Заглаживание бетонных поверхностей / А. А. Болотный. – Л.: Стройиздат, 1979. – 128 с.
2. Сидоров, Н. Н. Расчет заглаживающей способности дисковых машин / Н. Н. Сидоров, П. Е. Вайтехович // Вестник БНТУ. – 2006. – № 6. – С. 5–8.
3. Вайтехович, П. Е. Влияние геометрических параметров на динамику планетарных мельниц с внешней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическая промышленность. – 2005. – Т. 82. – № 1. – С. 36–39.

Материал поступил в редакцию 26.03.2018

KHVES'KO G. M., VAYTEKHOVICH P. Ye., BOROVSKIY D. N. Drive power of a disk smoothing machine with planetary drive

The object of the study was a disk smoothing machine with a planetary drive. The purpose of the work is the development of a technique for determining the power consumption of a drive machine. A calculated dependence was obtained to determine the total power for the smoothing process and its individual components. The change in power as a function of the angular velocity, the radius of the smoothing disk, and the geometric relationships of its drive are analyzed. The proposed calculation technique can be used in the design of disk smoothing machines with planetary drive.

УДК 621.794.61:539.23

Онысько С. Р., Хвисевич В. М., Томашев И. Г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПУАНСОНОВ И ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЙ

Введение. На машиностроительных предприятиях часто используются технологические процессы по обработке металлоизделий с помощью штамповой оснастки, эксплуатационные свойства которой оцениваются работоспособностью. Именно по ней определяется износ рабочих поверхностей наиболее нагруженных звеньев (пуансонов и матриц), который должен быть меньше своего критического значения [1]. Работа штампового оборудования всегда сопровождается комплексом сопутствующих процессов (вибрация, трение, нагрев и т. д.),

разрушающих узлы и детали штампа, главными из которых считаются износ и усталость металла [2, 3]. Рабочие инструменты штампа, например при пробивке отверстий, подвергаются значительному поверхностному давлению, а возникающие силы резания приводят к тому, что пуансон одновременно подвергается сжатию и продольному изгибу, если он даже несколько децентрирован [1, 4]. В результате многочисленных ударов кромки инструмента выкрашиваются, а иногда из-за недостаточной устойчивости происходит и поломка самого пуан-

Томашев Игорь Геннадьевич, ст. преподаватель кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

сона. Наиболее тяжело переносят сложное нагружение пуансоны малого диаметра, так как сжимающие силы приводят к появлению напряжений, которые могут достигать пятикратного своего значения прочности [5]. Работоспособность такого рода инструмента может быть повышена благодаря изменению поверхностных свойств инструментального материала за счет использования износостойких покрытий [6, 7] на его рабочих поверхностях, и поэтому для объективной оценки и выбора «правильного» покрытия актуальной является задача по определению реальных нагрузок на инструмент, которые возникают в процессе холодной листовой штамповки.

Объект исследования. Исследования по определению нагрузок, возникающих в процессе пробивки отверстий в листовом материале (сталь 20 (ГОСТ 1050–88)) толщиной 4 мм на цилиндрических пуансонах с рабочей частью диаметром 4,16 мм проводились на машиностроительном предприятии ОАО «Брестмаш». При выполнении экспериментов использовался аттестованный измерительный комплекс «ТИССА» и созданная экспериментальная установка (рисунок 1).

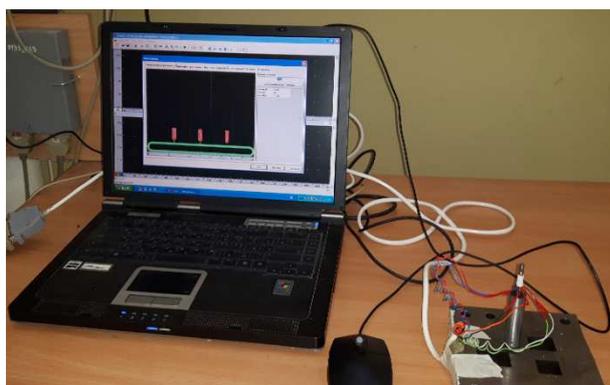


Рисунок 1 – Многоканальная компьютерная тензоизмерительная система «ТИССА» и экспериментальная установка для пробивки отверстий

Для определения относительных деформаций, возникающих в различных точках пробивного инструмента, при работе на штамповом оборудовании, была изготовлена партия экспериментальных пуансонов, изготовленных из стали марки Х12МФ (ГОСТ 5950-2000) и прошедших объемную закалку, часть из которых была также упрочнена нанокompозиционным ZrCN / а-С покрытием, детальное описание метода получения которого приводится в работе [8]. На цилиндрическую поверхность пуансонов диаметром 5,2 мм, при помощи универсального клея марки БФ-19, были закреплены три тензометрических датчика с сопротивлением $R = 200 \text{ Ом}$. Расположение датчиков на пуансоне указано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Расположение тензометрических датчиков на пуансоне

Датчики при помощи системы проводов подключались к измерительному комплексу «ТИССА», который позволял фиксировать происходящие изменения в инструменте, в пределах сотых долей секунды, что характерно для процессов штамповки листового материала.

Собранная экспериментальная установка фиксировалась в штампе прессы марки К2128Е, после чего проводились контрольные пробивки отверстий (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оборудование для проведения эксперимента

Во время эксперимента сигналы с тензометрических датчиков в реальном времени считывались на измеритель деформаций, обрабатывались программой комплекса «ТИССА» и переводились в программу Microsoft Office Excel, в результате чего фиксировались деформационные изменения, происходящие в инструменте во время его работы.

Перед проведением испытаний на комплексе устанавливалась наивысшая частота считывания сигнала (100 кгц), коэффициент тензочувствительности составлял 2,15. После калибровки датчиков запускался процесс измерений и снятие во время работы инструмента сигналы подвергались программной обработке и представлялись в виде отдельных диаграмм (рисунок 4).

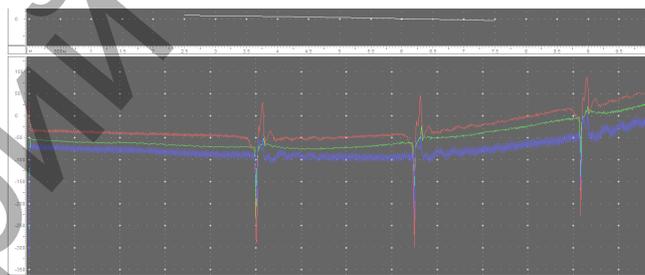


Рисунок 4 – Фрагмент окна с рабочей программы комплекса «ТИССА»

Результаты испытаний пуансонов без покрытия и с покрытием ZrCN / а-С показаны на рисунке 5.

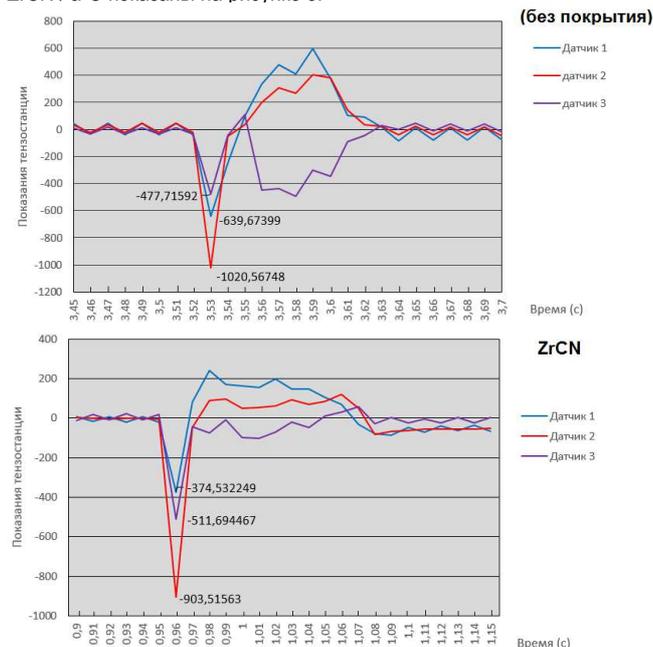


Рисунок 5 – Результаты тензометрирования испытываемых пуансонов

Анализ построенных диаграмм показывает, что время работы

исследуемого инструмента, включающее в себя процесс пробивки отверстия и процесс восстановления пуансона, составляет 0,11 с. Обращает на себя внимание разброс сигналов, снимаемых тензостанциями датчиками во время наибольшего нагружения, min значение которого составляет 477,7 единиц (датчик № 1) и max – 1020,6 (датчик № 2). Аналогичная ситуация наблюдается и при испытании пуансона с тонкопленочным покрытием – min значение 374,5 единиц (датчик №1) и max 903,5 (датчик № 2). Показания датчика № 3 имеет промежуточные значения как для первого (639,7), так и для второго исследования (511,7). Различие полученных значений под каждым датчиком свидетельствует о том, что нагрузка, действующая на инструмент, смещена на некоторую величину, то есть имеет место не центральное, а внецентренное приложение нагрузки как в первом, так и во втором испытании.

После пробивки отверстия (минимальные показания тензостанции на диаграммах) датчики фиксировали процесс обратной деформации инструмента при снятии нагрузки, которая имеет знакопеременный характер (датчики № 1 и № 2 фиксируют процессы удлинения инструмента (рисунок 5), а датчик № 3 находится в сжатых условиях), что свидетельствует о возникновении изгибных колебаний в инструменте, при релаксации удара.

При помощи программы SolidWorks была смоделирована картина фиксирования изменений деформации под каждым датчиком (в масштабе 1:100) и выявлено ее значение в центральной части (рисунок 6).

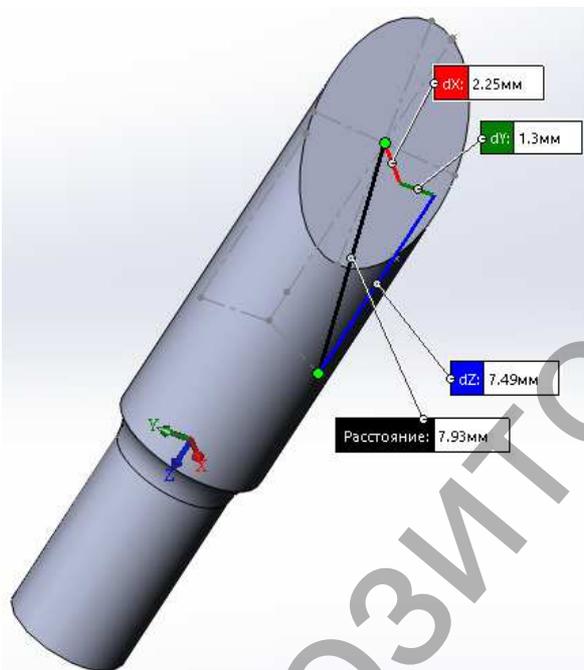


Рисунок 6 – Величина деформации в центральной части пуансона

Полученные результаты показывают, что перемещение центральной части пуансона есть среднее арифметическое от деформаций, фиксируемых каждым датчиком.

Исходя из показаний сигналов, фиксируемых тензостанцией, и коэффициента тензочувствительности датчиков, были определены относительные деформации отдельных участков инструмента и всего пуансона в процессе пробивки отверстий (таблица) без покрытия с нанесенным тонкопленочным покрытием на основе карбонитрида циркония. Кроме того, было определено значение интенсивности сжимающего

Таблица 1 – Относительная деформация инструмента и действующая нагрузка в процессе пробивки отверстия

Исследуемый пуансон	Показания тензостанции	Относительная деформация, $\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\epsilon_{cp} \cdot 10^{-3}$	F, (кН)
без покрытия	-688,01	-14,792	-16,115	68,4
	-1068,49	-22,973		
	-492,16	-10,581		
с покрытием (ZrCN)	-501,96	-10,441	-12,401	52,7
	-603,49	-18,793		
	-383,16	-7,97		

усилия на цилиндрическую поверхность инструмента с последующим определением действующей нагрузки на рабочую часть пуансона.

На рисунке 7 показана действующая нагрузка и возникающие напряжения на участках пробивного инструмента под каждым датчиком по отдельности.

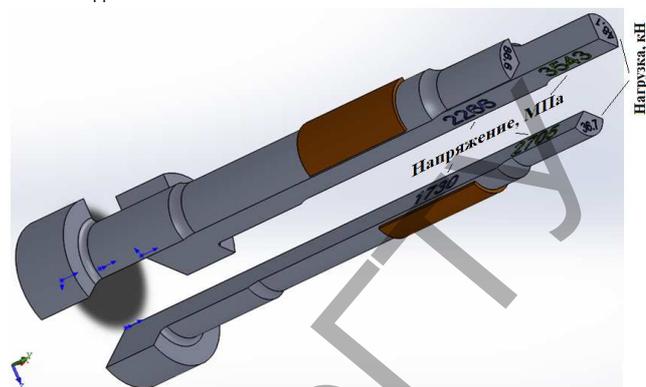


Рисунок 7 – Распределение напряжений и усилий в областях датчиков на пуансоне

Как видно из рисунка, наибольшую нагрузку, действующую на инструмент, воспринимает более тонкая, контактирующая с пробиваемым материалом, рабочая часть пуансона, где соответственно будут возникать наибольшие сжимающие напряжения, для уменьшения которых одним из вариантов является изменение диаметральных размеров инструмента, расчеты которых приведены в работе [4].

Как было установлено в процессе экспериментальных исследований во время работы пробивного инструмента, на его торцевую рабочую поверхность воздействует значительная нагрузка (на инструмент без покрытия 68,4 кН, а с нанесенным покрытием ZrCN – 52,7 кН), которая из-за размеров пуансона вызывает не только продольную, но и поперечную деформацию, поэтому инструмент в процессе пробивки отверстия подвергается продольно-поперечному изгибу.

Так как процесс пробивки в преобладающих случаях сопровождается внецентренным приложением нагрузки, то сам инструмент можно рассматривать как внецентренно-сжатую стойку, работающую в пределах упругих деформаций, и тогда боковое смещение может быть определено согласно схеме, изображенной на рисунке 8.

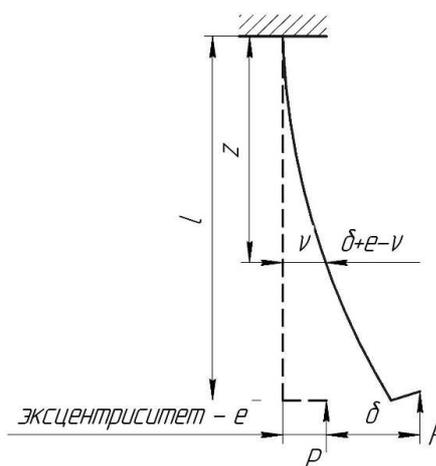


Рисунок 8 – Схема для расчета внецентренно-сжатой стойки

В произвольном сечении пуансона на расстоянии z изгибающий момент определяется по формуле:

$$M = P(\delta + e - v), \quad (1)$$

где e – величина эксцентриситета приложения нагрузки P ;

v – отклонение в горизонтальном направлении произвольной точки на оси пуансона.

Дифференциальное уравнение упругой линии при изгибе:

$$\frac{d^2v}{dz^2} = \frac{P(\delta + e - v)}{EI_x}, \quad (2)$$

где EI_x – жесткость инструмента.

Преобразовав уравнение (2), получим:

$$\frac{d^2v}{dz^2} + k^2v = k^2(\delta + e), \quad (3)$$

где коэффициент k определяется из соотношения:

$$k^2 = \frac{P}{EI_x}. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (3), получим:

$$v = C \cos kz + D \sin kz + \delta + e. \quad (5)$$

Постоянные интегрирования определяются из условия закрепления инструмента (при $z = 0$ угол поворота и прогиб равны нулю).

$$\left[\frac{dv}{dz} \right]_{z=0} = [-Ck \sin kz + Dk \cos kz]_{z=0} = Dk = 0, \Rightarrow D = 0. \quad (6)$$

$$v_{z=0} = C + \delta + e = 0, \Rightarrow C = -(\delta + e). \quad (7)$$

Подстановка величины C в уравнение (5) дает:

$$v = (\delta + e)(1 - \cos kz). \quad (8)$$

При $z = l$, $v = \delta$, поэтому:

$$(\delta + e)(1 - \cos kz) = \delta. \quad (9)$$

Решая данное уравнение относительно величины $(\delta + e)$, можно получить формулу для определения перемещения в любой точке рассматриваемого пуансона:

$$v = \frac{e}{\cos kl}(1 - \cos kz). \quad (10)$$

На основании данных, полученных при проведении испытаний по определению относительной деформации, и вычисленных значений действующей нагрузки на пуансон с нанесенным покрытием ZrCN / a-C и без него, были определены поперечные деформации пробивного инструмента без учета величины эксцентриситета. Результаты расчетов показаны на рисунке 9.

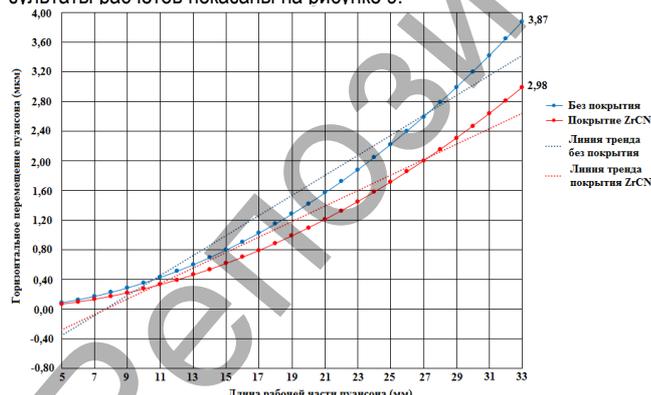


Рисунок 9 – Характер зависимостей поперечной деформации пуансона

Расчеты бокового смещения инструмента, приведённые на рисунке 9, показывают, что максимальная деформация в 3,87 мкм возникает в инструменте без покрытия и она нелинейно уменьшается при изменении длины пуансона. В инструменте с нанесенным покрытием ZrCN / a-C, максимальная боковая деформация уменьша-

ется на 23 % и составляет 2,98 мкм. Анализ полученных графиков и проведенных линий трендов, по уменьшению длины рабочей части пуансона, показывают, что оптимальная длина пробивной части находится в пределах (7,5-8) мм.

Данные диаграммы на рисунке 9 показаны при идеальном приложении нагрузки, но так как в процессе пробивки имеет место внецентренное нагружение, как было показано ранее, то полученные значения боковых деформаций необходимо увеличить согласно формуле 10 пропорционально эксцентриситету, то есть в n -раз, а это приведет к увеличению бокового отклонения инструмента, повысит гибкость и увеличит нагрузку на режущую кромку, что приведет к охрупчиванию и преждевременному износу рабочей части инструмента или полностью его поломке.

Заключение. Как показали исследования, наносимые покрытия ZrCN / a-C обладают высокой твердостью и более низким коэффициентом трения по стали, чем материал основы, а это является одной из причин в использовании такого рода покрытий для повышения эксплуатационных характеристик ударно-штампового инструмента. Вторым положительным эффектом применения покрытий является уменьшение относительной деформации пуансона на 23 %. Это приводит к снижению усилия резания заготовки и уменьшает вероятность охрупчивания режущей кромки пуансона при ударной нагрузке. В связи с этим отпадает необходимость в предусмотренной по техническому регламенту сравнительно длинной рабочей части пробивного пуансона, которая является своеобразным демпфером и «смягчает» действие нагрузки на режущую кромку. В результате представляется возможность оптимизировать форму пуансона, которая в своей конструкции содержит покрытие.

Уменьшение размеров рабочей части пробивного пуансона положительно сказывается на его продольно-поперечной устойчивости и снижает вероятность поломки при отсутствии точного центрирования инструмента, что часто имеет место в производственных условиях при работе штампового оборудования и является одной из основных причин выхода его из строя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Околович, Г. А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов: монография / Г. А. Околович; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – изд. 2-е, переработанное, дополненное. – 202 с.
- Позняк, Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрыпченко, С. И. Тишаев – М.: Металлургия, 1980. – 243 с.
- Корнилова, А. В. Определение долговечности инструмента для холодной листовой штамповки по критериям трибофатиги / А. В. Корнилова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2006. – № 2. – С. 88–94.
- Онысько, С. Р. Повышение эксплуатационных свойств цилиндрических пуансонов путем оптимизации их геометрических параметров / С. Р. Онысько, В. М. Хвисевич, Н. М. Чекан, Н. Н. Пушко // Вестник БрГТУ. – 2017. – № 4(106): Машиностроение. – С. 6–11.
- Артигер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 311 с.
- Vetter, J. Tribological behavior and mechanical properties of physical-vapour-deposited hard coatings: TiN_x, ZrN_x, TiC_x, TiC_x/i-C / J. Vetter, R. Rochotzki // Thin Solid Films. – 1990. – Vol. 192. – P. 253–261.
- Aramcharoen, A. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel / A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, S. Yang, K. E. Cooke, D. G. Teer // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – № 14. – P. 1578–1584.
- Чекан, Н. М. Износостойкие нанокристаллические покрытия для штамповой оснастки / Н. М. Чекан, И. П. Акула, И. Б. Василевич, В. М. Хвисевич, С. Р. Онысько // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IX Международной научно-технической конференции. 16–18 сентября 2014 г., Минск, Беларусь. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Т. 2. – С. 6–16.

Материал поступил в редакцию 11.11.2018

ONYSKO S. R., HVISEVICH V. M., TOMASHEV I. G. Definition of efforts of the strengthened cylindrical punches and their relative deformation in technological processes of a punched hole of openings

This work is aimed at an experimental study of the loads arising in the process of working on a punching tool using ZrCN / a-C coating. It is established that the tool life is increased by more than 2 times, and the load in the cutting zone and the relative deformation of the punch are reduced by 23%.