

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОСЛЕ ПАЙКИ В ТВЕРДОСПЛАВНОМ ФРЕЗЕРНОМ НОЖЕ

In this article the calculation of residual strains after brazing for hard-facing-alloy knives are given.  
Combinations of different steels and hard-facing alloys are considered.

**Введение.** Широкое применение в деревообработке труднообрабатываемых древесных материалов (ДСтП и др.), имеющих высокие абразивные свойства, требует использования режущего инструмента, оснащенного пластинками из твердого сплава. Для выполнения фрезерных работ применяют ножи длиной от 25 до 110 мм. Твердосплавные пластинки таких размеров по длине существуют, но их ширина составляет всего 15 мм. Поэтому для крепления их предварительно паяют на стальную подложку. Пайка твердосплавного инструмента припоями на основе серебра или меди обычно обеспечивала необходимую прочность соединения, поэтому долгое время считалось, что технология пайки не требует изучения и анализа. Единственной причиной поломок твердосплавных пластин даже при обработке натуральной древесины считали недостаточную прочность самих твердых сплавов, которые впоследствии заменили на более прочные. Однако позднее появились работы [1, 2], из которых следовало, что в результате пайки в твердосплавных ножах возникают остаточные напряжения, которые, суммируясь с напряжениями от заточки и эксплуатации инструмента, приводят к поломкам твердосплавных ножей. Необходимость учитывать такой фактор, влияющий на работоспособность твердосплавного дереворежущего инструмента, как наличие остаточных напряжений в пластине твердого сплава, делает актуальной разработку теории для определения деформаций и напряжений, возникающих в заготовке твердосплавного ножа после пайки.

**Теоретические исследования.** Конструкция заготовки паяного твердосплавного ножа состоит из стальной подложки 1 и пластины твердого сплава 2 (рис. 1). С момента возникновения полной адгезии между пластинкой твердого сплава 2 и стальной подложкой 1 конструкция будет работать как единое целое. Однако из-за разных значений коэффициентов линейного расширения твердого сплава и стальной подложки по мере остывания в конструкции будут возникать остаточные напряжения и деформации.

Для нахождения величин остаточных напряжений в представленной конструкции, по аналогии с работами [3–6], следует определить вызванные пайкой деформации. Так, на

участке  $abcd a_1 b_1 c_1 d_1$  будут возникать в направлении оси  $Z$  остаточные упругие деформации, связанные с линейным изменением размеров на оси  $Z$  и с изгибом в двух плоскостях: в плоскости  $ZOY$  и в плоскости  $ZOX$ . В направлении оси  $X$  на этом участке будут возникать деформации, связанные линейным изменением размеров по оси  $X$  и с изгибом в плоскости  $XOY$ . На участке  $bkfcb_1 k_1 f_1 c_1$  будут возникать остаточные упругие деформации только в направлении оси  $Z$ . Эти деформации, как и на предыдущем участке, будут связаны с линейными изменениями размеров по оси  $Z$  и с изгибом в двух плоскостях: в плоскости  $ZOY$  и в плоскости  $ZOX$ .

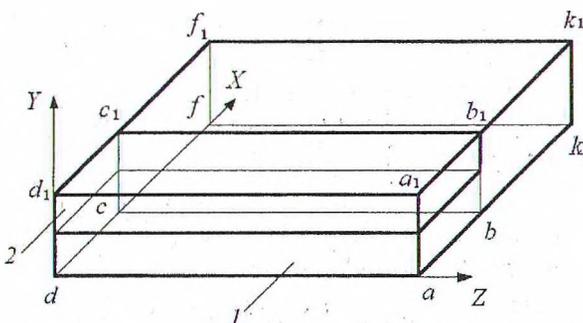


Рис. 1. Конструкция заготовки паяного ножа

Рассмотрим участок  $abcd a_1 b_1 c_1 d_1$ .

Деформации в направлении оси  $X$  для первого и второго слоев

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{X(1)} &= \varepsilon_{OX} - X_{XY}Y - \alpha_1 \Delta T, \\ \varepsilon_{X(2)} &= \varepsilon_{OX} - X_{XY}Y - \alpha_2 \Delta T, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{OX}$  – деформация в начале координат в направлении оси  $X$ ;  $X_{XY}$  – кривизна оси  $X$  в плоскости  $XOY$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного расширения слоев 1 и 2;  $\Delta T$  – разность температур, °С.

Деформации в направлении оси  $Z$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{Z(1)} &= \varepsilon_{OZ} - X_{ZY}Y - X_{ZX}X - \alpha_1 \Delta T, \\ \varepsilon_{Z(2)} &= \varepsilon_{OZ} - X_{ZY}Y - X_{ZX}X - \alpha_2 \Delta T, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{OZ}$  – деформация в начале координат в направлении оси  $Z$ ;  $X_{ZY}$  – кривизна оси  $Z$  в плоскости  $ZOY$ ;  $X_{ZX}$  – кривизна оси  $Z$  в плоскости  $ZOX$ .

Эти деформации можно выразить через напряжения согласно обобщенному закону Гука

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{X(1)} &= \frac{\sigma_{X(1)}}{E_1} - \frac{\mu_1}{E_1} \sigma_{Z(1)}, \\ \varepsilon_{X(2)} &= \frac{\sigma_{X(2)}}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \sigma_{Z(2)}, \\ \varepsilon_{Z(1)} &= \frac{\sigma_{Z(1)}}{E_1} - \frac{\mu_1}{E_1} \sigma_{X(1)}, \\ \varepsilon_{Z(2)} &= \frac{\sigma_{Z(2)}}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \sigma_{X(2)}, \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $E_1, E_2$  – модули упругости слоев 1 и 2;  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона слоев 1 и 2;  $\sigma_{X(1)}, \sigma_{X(2)}, \sigma_{Z(1)}, \sigma_{Z(2)}$  – нормальные напряжения, возникающие в слоях 1 и 2 в направлении оси  $X$  и  $Z$  соответственно. Решая совместно уравнения (3), выразим величины остаточных напряжений через деформации:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{X(1)} &= D_1 \times (\varepsilon_{X(1)} + \mu_1 \times \varepsilon_{Z(1)}), \\ \sigma_{X(2)} &= D_2 \times (\varepsilon_{X(2)} + \mu_2 \times \varepsilon_{Z(2)}), \\ \sigma_{Z(1)} &= D_1 \times (\varepsilon_{Z(1)} + \mu_1 \times \varepsilon_{X(1)}), \\ \sigma_{Z(2)} &= D_2 \times (\varepsilon_{Z(2)} + \mu_2 \times \varepsilon_{X(2)}), \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{где } D_1 = \frac{E_1}{1 - \mu_1^2}, D_2 = \frac{E_2}{1 - \mu_2^2}. \quad (5)$$

Подставляя выражения для деформаций (1) и (2) в уравнение (4), получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{X(1)} &= D_1 [\varepsilon_{OX} + \mu_1 \varepsilon_{OZ} - (X_{XY} + \mu_1 X_{ZY})Y - \\ &\quad - \mu_1 X_{ZX}X - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1)], \\ \sigma_{X(2)} &= D_2 [\varepsilon_{OX} + \mu_2 \varepsilon_{OZ} - (X_{XY} + \mu_2 X_{ZY})Y - \\ &\quad - \mu_2 X_{ZX}X - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2)], \\ \sigma_{Z(1)} &= D_1 [\varepsilon_{OZ} + \mu_1 \varepsilon_{OX} - (X_{ZY} + \mu_1 X_{XY})Y - \\ &\quad - X_{ZX}X - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1)], \\ \sigma_{Z(2)} &= D_2 [\varepsilon_{OZ} + \mu_2 \varepsilon_{OX} - (X_{ZY} + \mu_2 X_{XY})Y - \\ &\quad - X_{ZX}X - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2)]. \end{aligned} \right\} (6)$$

Запишем уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \sum X = 0; & \int_{A_{1X}} \sigma_{X(1)} dA_{1X} + \int_{A_{2X}} \sigma_{X(2)} dA_{2X} = 0, \\ \sum M_Z = 0; & \int_{A_{1X}} \sigma_{X(1)} Y dA_{1X} + \int_{A_{2X}} \sigma_{X(2)} Y dA_{2X} = 0, \\ \sum Z = 0; & \int_{A_{1Z}} \sigma_{Z(1)} dA_{1Z} + \int_{A_{2Z}} \sigma_{Z(2)} dA_{2Z} = 0, \\ \sum M_X = 0; & \int_{A_{1Z}} \sigma_{Z(1)} Y dA_{1Z} + \int_{A_{2Z}} \sigma_{Z(2)} Y dA_{2Z} = 0, \\ \sum M_Y = 0; & \int_{A_{1Z}} \sigma_{Z(1)} X dA_{1Z} + \int_{A_{2Z}} \sigma_{Z(2)} X dA_{2Z} = 0, \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $A_{1X}$  – площадь сечения первого слоя, если сечение проведено перпендикулярно оси  $X$ ;  $A_{2X}$  – площадь сечения второго слоя, если сечение проведено перпендикулярно оси  $X$ ;  $A_{1Z}$  – площадь сечения первого слоя, если сечение проведено перпендикулярно оси  $Z$ ;  $A_{2Z}$  – площадь сечения второго слоя, если сечение проведено перпендикулярно оси  $Z$ .

Подставим в уравнение равновесия (7) значения напряжений согласно (6). Получим следующую систему напряжений

$$\left. \begin{aligned} D_1 [ & (\varepsilon_{OX} + \mu_1 \varepsilon_{OZ}) A_{1X} - (X_{XY} + \mu_1 X_{ZY}) S_{1Z} - \\ & - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1) A_{1X} - \mu_1 X_{ZX} A_{1X} X ] + D_2 \times \\ & \times [ (\varepsilon_{OX} + \mu_2 \varepsilon_{OZ}) A_{2X} - (X_{XY} + \mu_2 X_{ZY}) S_{2Z} - \\ & - \mu_2 X_{ZX} A_{2X} - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2) A_{2X} ], \\ D_1 [ & (\varepsilon_{OX} + \mu_1 \varepsilon_{OZ}) S_{1Z} - (X_{XY} + \mu_1 X_{ZY}) J_{1Z} - \\ & - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1) S_{1Z} - \mu_1 X_{ZX} S_{1Z} X ] + D_2 \times \\ & \times [ (\varepsilon_{OX} + \mu_2 \varepsilon_{OZ}) A_{2Z} - (X_{XY} + \mu_2 X_{ZY}) J_{2Z} - \\ & - \mu_2 X_{ZX} S_{2Z} X - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2) S_{2Z} ], \\ D_1 [ & (\varepsilon_{OZ} + \mu_1 \varepsilon_{OX}) A_{1Z} - (X_{ZY} + \mu_1 X_{XY}) S_{1X} - \\ & - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1) A_{1Z} - X_{ZX} S_{1Y} ] + D_2 \times \\ & \times [ (\varepsilon_{OZ} + \mu_2 \varepsilon_{OX}) A_{2Z} - (X_{ZY} + \mu_2 X_{XY}) S_{2Z} - \\ & - X_{ZX} S_{2Y} - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2) A_{2Z} ], \\ D_1 [ & (\varepsilon_{OZ} + \mu_1 \varepsilon_{OX}) S_{1Y} - (X_{ZY} + \mu_1 X_{XY}) J_{1XY} - \\ & - \alpha_1 \Delta T (1 + \mu_1) S_{1Y} - X_{ZX} J_{1Y} ] + D_2 \times \\ & \times [ (\varepsilon_{OZ} + \mu_2 \varepsilon_{OX}) S_{2Y} - (X_{ZY} + \mu_2 X_{XY}) J_{2ZY} - \\ & - X_{ZX} J_{2Y} - \alpha_2 \Delta T (1 + \mu_2) S_{2Y} ], \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $S_{1Z}, S_{2Z}, J_{1Z}, J_{2Z}$  – статические моменты и моменты инерции относительно оси  $Z$ , сечения первого и второго слоев соответственно, если сечение проведено перпендикулярно оси  $X$ ;  $S_{1Y}, S_{2Y}, J_{1Y}, J_{2Y}$  – статические моменты и моменты инерции относительно оси  $Y$ , сечения первого и второго слоев соответственно, если сечение проведено перпендикулярно оси  $Z$ ;  $J_{1XY}, J_{2XY}$  – центробежные моменты инерции относительно осей  $X$  и  $Y$ , сечения первого и второго слоев соответственно, если сечение проведено перпендикулярно оси  $Z$ .

Суммируем неизвестные в системе уравнений (8) и, преобразуя его, получим:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \varepsilon_{OX} + a_{12} \varepsilon_{OZ} + a_{13} X_{XY} + a_{14} X_{ZY} + a_{15} X_{ZX} &= b_1, \\ a_{21} \varepsilon_{OX} + a_{22} \varepsilon_{OZ} + a_{23} X_{XY} + a_{24} X_{ZY} + a_{25} X_{ZX} &= b_2, \\ a_{31} \varepsilon_{OX} + a_{32} \varepsilon_{OZ} + a_{33} X_{XY} + a_{34} X_{ZY} + a_{35} X_{ZX} &= b_3, \\ a_{41} \varepsilon_{OX} + a_{42} \varepsilon_{OZ} + a_{43} X_{XY} + a_{44} X_{ZY} + a_{45} X_{ZX} &= b_4, \\ a_{51} \varepsilon_{OX} + a_{52} \varepsilon_{OZ} + a_{53} X_{XY} + a_{54} X_{ZY} + a_{55} X_{ZX} &= b_5, \end{aligned} \right\} (9)$$

где  $a_{11} = D_1 A_{1X} + D_2 A_{2X}$ ;

$$\begin{aligned}
a_{12} &= D_1 \mu_1 A_{1X} + D_2 \mu_2 A_{2X}; \\
a_{13} &= -(D_1 S_{1Z} + D_2 S_{2Z}); \\
a_{14} &= -(D_1 \mu_1 S_{1Z} + D_2 \mu_2 S_{2Z}); \\
a_{15} &= -(D_1 \mu_1 A_{1X} + D_2 \mu_2 A_{2X})X; \\
b_1 &= \Delta T [D_1 \alpha_1 (1 + \mu_1) A_{1X} + D_2 \alpha_2 (1 + \mu_2) A_{2X}]; \\
a_{21} &= D_1 S_Z + D_2 S_{2Z}; \\
a_{22} &= D_1 \mu_1 S_{1Z} + D_2 \mu_2 S_{2Z}; \\
a_{23} &= -(D_1 J_{1Z} + D_2 J_{2Z}); \\
a_{24} &= -(D_1 \mu_1 J_{1Z} + D_2 \mu_2 J_{2Z}); \\
a_{25} &= -(D_1 \mu_1 S_{1Z} + D_2 \mu_2 S_{2Z})X; \\
b_2 &= \Delta T [D_1 \alpha_1 (1 + \mu_1) S_{1Z} + D_2 \alpha_2 (1 + \mu_2) S_{2Z}]; \\
a_{31} &= D_1 \mu_1 A_{1Z} + D_2 \mu_2 A_{2Z}; \\
a_{32} &= D_1 A_{1Z} + D_2 A_{2Z}; \\
a_{23} &= -(D_1 \mu_1 S_{1X} + D_2 \mu_2 S_{2X}); \\
a_{34} &= -(D_1 S_{1X} + D_2 S_{2X}); \\
a_{35} &= -(D_1 S_{1Y} + D_2 S_{2Y}); \\
b_3 &= \Delta T [D_1 \alpha_1 (1 + \mu_1) A_{1Z} + D_2 \alpha_2 (1 + \mu_2) A_{2Z}]; \\
a_{41} &= D_1 \mu_1 S_{1z} + D_2 \mu_2 S_{2z}; \\
a_{42} &= D_1 S_{1X} + D_2 S_{2X}; \\
a_{43} &= -(D_1 \mu_1 J_{1X} + D_2 \mu_2 J_{2X}); \\
a_{44} &= -(D_1 J_{1X} + D_2 J_{2X}); \\
a_{45} &= -(D_1 J_{1XY} + D_2 J_{2XY}); \\
b_4 &= \Delta T [D_1 \alpha_1 (1 + \mu_1) S_{1X} + D_2 \alpha_2 (1 + \mu_2) S_{2X}]; \\
a_{51} &= D_1 \mu_1 S_{1Y} + D_2 \mu_2 S_{2Y}; \\
a_{52} &= D_1 S_{1Y} + D_2 S_{2Y}; \\
a_{53} &= -(D_1 \mu_1 J_{1XY} + D_2 \mu_2 J_{2XY}); \\
a_{54} &= -(D_1 J_{1XY} + D_2 J_{2XY}); \\
a_{55} &= -(D_1 J_{1Y} + D_2 J_{2Y}); \\
b_5 &= \Delta T [D_1 \alpha_1 (1 + \mu_1) S_{1Y} + D_2 \alpha_2 (1 + \mu_2) S_{2Y}].
\end{aligned}$$

Когда из системы уравнений (9) определены  $\epsilon_{0X}$ ,  $\epsilon_{0Z}$ ,  $X_{XY}$ ,  $X_{ZY}$ ,  $X_{ZX}$ , по формулам (6) можно определить остаточные напряжения и деформации заготовки.

Задача определения величины остаточных деформаций была решена с применением математического пакета MathCad 2001 Pro.

Для наиболее распространенных твердосплавных пластин формы 04D, которые применяются для цилиндрических сборных, концевых и пазовых фрез, толщина составляет 2 мм [7].

В качестве постоянных факторов приняты: пластина твердого сплава размерами 60×15×2, длина подложки 60 мм, ширина 40 мм. К переменным факторам отнесены марка твердого сплава, толщина и материал подложки.

Результаты расчетов приведены в виде графиков, на которых представлены зависимости величин прогиба от толщины и материала подложки в паяном ноже с пластинкой твердого сплава ВК6 (рис. 2), ВК8 (рис. 3) и ВК15 (рис. 4). В качестве материала для подложки в расчете принята сталь 45, 40Х и 30ХГСА.

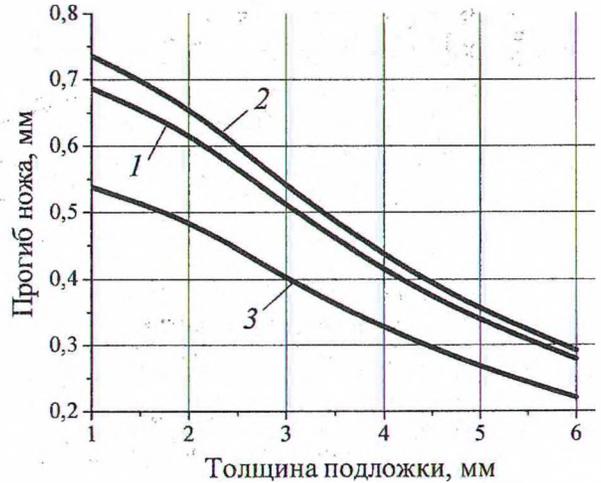


Рис. 2. Зависимость прогиба паяного ножа (ВК6) от толщины и материала подложки (1 – сталь 45; 2 – сталь 40Х; 3 – сталь 30ХГСА)

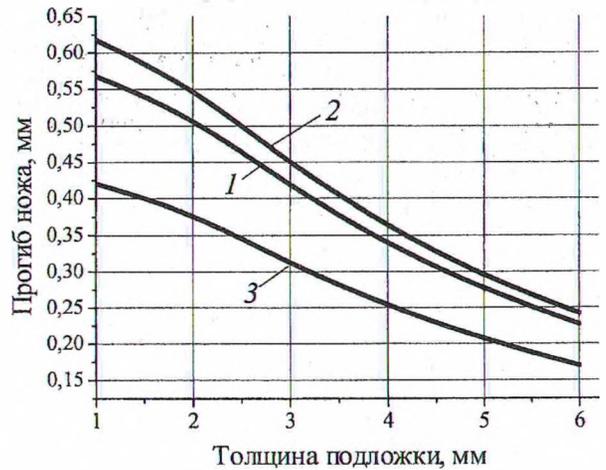


Рис. 3. Зависимость прогиба паяного ножа (ВК8) от толщины и материала подложки (1 – сталь 45; 2 – сталь 40Х; 3 – сталь 30ХГСА)

Очевидно, во всех случаях с ростом толщины подложки прогиб ножа уменьшается, а полученные зависимости описываются полиномом третьей степени. Из графиков следует, что конструкция фрезерного твердосплавного ножа с подложкой из стали 30ХГСА обеспечивает меньший прогиб по сравнению с другими сталями. Марка твердого сплава также влияет на

величину остаточных деформаций после пайки. Сопоставление графиков рис. 2, рис. 3 и рис. 4 позволяет сделать вывод, что применение в качестве материала паяемых пластин твердого сплава ВК15 снижает величину остаточных деформаций ножа на 15–35%. Полученные значения величин деформаций хорошо согласуются с данными экспериментальных работ [8].

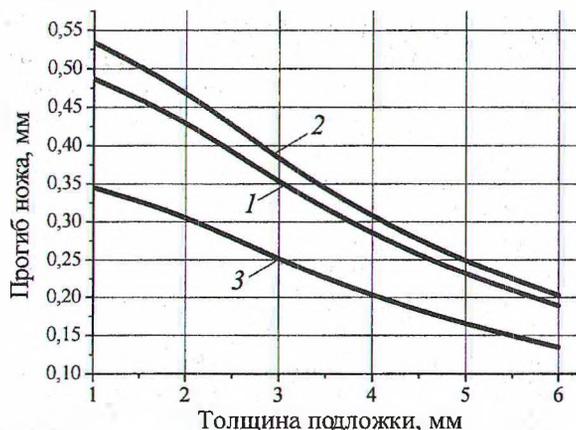


Рис. 4. Зависимость прогиба паяного ножа (ВК15) от толщины и материала подложки (1 – сталь 45; 2 – сталь 40Х; 3 – сталь 30ХГСА)

**Выводы.** 1. Проведенные исследования позволили определить влияние марки твердого сплава, толщины и материала подложки на величину остаточных деформаций в твердосплавном фрезерном ноже после пайки.

2. На основе результатов расчетов можно рекомендовать использовать для изготовления паяных ножей подложку из легированной стали 30ХГСА и твердый сплав марки ВК15, что обеспечит снижение величины остаточных напряжений и деформаций в конструкции.

## Литература

1. Имшенник, К. П. Технология пайки твердосплавного инструмента / К. П. Имшенник, Н. А. Бухман. – М.: Машгиз, 1954. – 160 с.
2. Повышение точности и износостойкости твердосплавного инструмента / под ред. Н. А. Сагалова. – М.: Машиностроение, 1968. – 140 с.
3. Макаревич, С. С. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния в биметаллическом инструменте при пайке / С. С. Макаревич, А. А. Клубков // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1992. – № 6. – С. 62–65.
4. Макаревич, С. С. Расчет остаточных напряжений в биметаллической заготовке дереворежущего инструмента после индукционной пайки / С. С. Макаревич, А. А. Клубков // Труды БТИ. Сер. II, Лесн. и деревообраб. пром-сть. – 1993. – Вып. 1. – С. 110–115.
5. Макаревич, С. С. Остаточные напряжения в двухслойной заготовке фрезерного ножа с несимметричным поперечным сечением / С. С. Макаревич, А. А. Клубков // Труды БГТУ. Сер. II, Лесн. и деревообраб. пром-сть. – 1994. – Вып. 2. – С. 112–115.
6. Клубков, А. А. Определение остаточных деформаций в твердосплавных ножах / А. А. Клубков // Деревообрабатывающая промышленность. – 1996. – № 2. – С. 9–10.
7. Морозов, В. Г. Дереворежущий инструмент: справочник / В. Г. Морозов – М.: Лесная пром-сть, 1988. – 344 с.
8. Клубков, А. А. Повышение износостойкости и прочности твердосплавного режущего инструмента для обработки древесных материалов фрезерованием: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / А. А. Клубков. – Минск, 1997. – 165 с.