

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ВАЛА

Ли Ян, Чжан Цзяюй, Го Инбинь

Научный руководитель: Виктор Николаевич Козлов, к. т. н, доцент ТПУ

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Лезвийная обработка заготовок сопровождается изнашиванием режущего инструмента. Износ инструмента может проявляться на следующих поверхностях режущего инструмента (рис. 1):

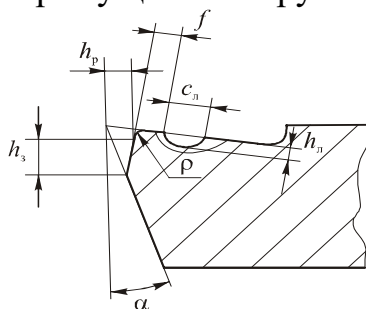


Рис. 1. Зоны износа режущего клина в главной секущей плоскости

1) на передней поверхности с образованием лунки износа глубиной h_n и длиной c_n ;

2) на режущей кромке инструмента с образованием округления радиусом ρ ;

3) на задней поверхности с образованием фаски износа шириной h_z и с отрицательным задним углом на фаске износа α_n .

Для того, чтобы оценить работоспособность режущего инструмента необходимо провести стойкостные эксперименты. При их проведении необходимо, прежде всего, определиться с критерием износа. Под критерием износа понимается наступления явления, после которого резание нецелесообразно и режущий инструмент требуется сменить или переточить. В качестве критериев могут быть использованы следующие параметры:

1. Существенное ухудшение качества обработанной поверхности (увеличение шероховатости, появление рисок или надрывов и т.п.);

2. Появление свиста или вибрации во время резания;

3. Увеличение силы резания, особенно радиальной составляющей P_y , что приводит к увеличению упругой деформации системы СПИД и уменьшению точности обработки;

4. Изменение цвета стружки, т.к. это свидетельствует об увеличении температуры резания, что приводит к повышенному химическому износу и размягчению связки;

5. Появление конусности вместо цилиндрической формы, что свидетельствует об увеличении интенсивности размерного износа h_p (рис. 1);

6. Увеличение длины фаски износа по задней поверхности h_z до предельно допустимой величины.

Могут быть и другие критерии износа, например, ухудшение завивания стружки, появление местного износа на главной задней поверхности в месте контакта с загрязнённой твёрдыми окислами и окалиной обрабатываемой поверхностью (ус), износ вершины инструмента (при сверлении и фрезеровании это износ по уголкам) и т.п.

Чаще всего в качестве наиболее объективного критерия износа принимается предельно допустимая длина фаски износа по задней поверхности ($h_{z\max}$, или в англоязычной литературе $h_{f\max}$) тем более, что все остальные параметры вызваны увеличением h_z .

По мере увеличения ширины износа h_z увеличивается и температура резания, и сила на задней поверхности. Если прочность инструмента недостаточна, то происходит скол режущего клина. Длину износа h_z в этот момент называют критической по прочности $h_{z\text{ крит.пр}}$ и стараются ни в коем случае не допускать.

При увеличении износа по задней поверхности увеличивается размерный износ, вызванный изменением расположения **вершины** режущей кромки относительно его первоначального положения на величину Δh_p (рис. 1). $\Delta h_p = h_{fv} \cdot \operatorname{tg} \alpha_v$, где α_v – задний угол при вершине режущего инструмента. Этот угол не надо путать с главным задним углом α , который при токарной обработке измеряется в плоскости, перпендикулярной основной плоскости и проекции главной режущей кромки на основную плоскость [1].

Задний угол при вершине режущего инструмента при токарной обработке измеряется в плоскости, перпендикулярной основной плоскости и оси вращения заготовки. Длина фаски износа по задней поверхности при вершине резца измеряется в этой же плоскости. При малой величине главного и вспомогательного задних углов ($\alpha \approx \alpha_1 \approx 10^\circ$) задний угол при вершине $\alpha_v \approx \alpha$.

Длина фаски износа по задней поверхности при вершине режущего инструмента h_{fv} не равна длине фаски износа по главной задней поверхности h_f . Обычно $h_{fv} > h_f$ в связи с большей температурой резания у вершины режущего инструмента, что вызвано ухудшением теплоотвода в этой области. Поэтому при проведении стойкостных

испытаний необходимо измерять не только h_f , как это обычно делается, но и h_{fv} . Величина h_f влияет на составляющие силы резания в большей степени, чем h_{fv} из-за малой доли сил в этой области, особенно при большой глубине резания t ($t > 2$ мм).

При измерении составляющих силы резания нет необходимости выделять силы, действующие при вершине или на основном участке главной режущей кромки, т.к. общая радиальная технологическая составляющая сила P_y , измеряемая динамометром, отжимает заготовку от её номинального положения, и эта же сила отжимает резец от заготовки.

Тангенциальная P_z , продольная P_x , и радиальная P_y технологические составляющие силы резания были измерены с помощью динамометра Kistler [2] при разной длине фаски износа на задней поверхности (рис. 2).

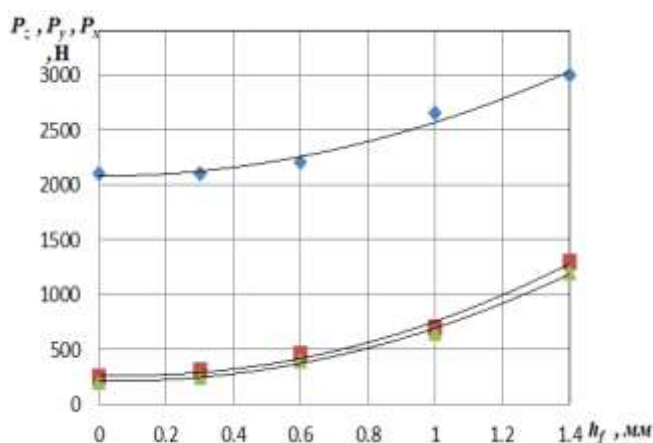


Рис. 2. Влияние длины фаски износа на задней поверхности h_f (мм) на составляющие силы резания P_z , P_y , P_x (Н) (мин). Сталь 40X-T15K6

Диаметр заготовки увеличивается на удвоенную величину упругой деформации $y_{заг}$ и размерного износа Δh_p , т.е. погрешность диаметра $\Delta d = 2 \cdot (y_{заг} + \Delta h_p)$.

Изменение диаметра заготовки $\Delta d_{упр}$ (мм) из-за её упругой деформации в результате увеличения радиальной составляющей силы резания P_y (Н) в процессе износа токарного резца можно рассчитать по формуле:

$$\Delta d_{упр} = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{заг} + J_{шп} + J_{резцедр}), \quad (1)$$

где: ΔP_y — изменение радиальной составляющей силы резания P_y после увеличения длины фаски износа на главной задней поверхности на величину h_f (мм) по сравнению с острым резцом (рис. 2); $J_{заг}$ — жёсткость заготовки (Н/мм); $J_{шп}$ — общая жёсткость шпиндельного узла станка и

токарного патрона (Н/мм); $J_{\text{резцедр}}$ – общая жёсткость резца, резцедержателя и продольного суппорта (Н/мм).

Для экспериментального определения общей жёсткости шпиндельного узла станка и токарного патрона в трёхкулачковом самоцентрирующем патроне закрепляется стойка с индикатором (цена деления 1 мкм), наконечник которого контактирует с концевой мерой длины, закреплённой в резцедержателе. Приложение радиальной (горизонтальной) силы P_y к корпусу токарного патрона через образцовый токарный динамометр в направлении к оси вращения шпинделя (от оператора) приводит к упругой деформации шпиндельного узла и токарного патрона, которая измеряется индикатором. Отношение приложенной силы P_y к показанию индикатора $\Delta_{\text{и}}$ есть жёсткость исследуемых узлов станка.

При исследовании общей жёсткости резцедержателя и продольного суппорта горизонтальная сила P_y через образцовый токарный динамометр прилагается к резцедержателю в направлении оператора, т.е. так, как она действует на резец. Жёсткость резца при этом принимается намного большей по сравнению с жёсткостью резцедержателя, т.е. рассматривается как абсолютно твёрдое тело.

При исследовании жёсткости токарного станка 1К62, используемого при проведении экспериментов, были получены следующие данные:

$$J_{\text{шп}} = P_y / \Delta_{\text{и}} = 150 \text{ Н} / 0,005 = 30\,000 \text{ Н/мм.}$$

$$J_{\text{резцедр}} = P_y / \Delta_{\text{и}} = 150 \text{ Н} / 0,03 = 5\,000 \text{ Н/мм.}$$

Жёсткость заготовки зависит от способа её закрепления, её диаметра и длины. Наибольшее отжатие заготовки (отклонение от начального положения под действием радиальной составляющей силы резания P_y) $y_{\text{заг max}}$ (мм) при консольном закреплении в патроне имеется у правого торца, которое рассчитывается по формуле

$$y_{\text{заг max}} = M_{P_y} \cdot l^2 / (3 \cdot E \cdot I) = P_y \cdot l^3 / (3 \cdot E \cdot I), \quad (2)$$

где: M_{P_y} – изгибающий момент от действия радиальной составляющей силы резания P_y (Н) при наибольшем вылете заготовки на величину l (мм) относительно токарного патрона (Н·мм); l – длина заготовки от патрона до её правого конца (вылет заготовки) (мм); E – модуль упругости (модуль Юнга) (Н/мм²). Для стальной заготовки $E = 0,21 \cdot 10^6$ (МПа) = $0,21 \cdot 10^6 \cdot 10^6$ (Па) = $0,21 \cdot 10^6 \cdot 10^6$ (Н/м²) = $0,21 \cdot 10^6 \cdot 10^6$ (Н/мм²); I – момент инерции поперечного сечения заготовки (мм⁴). Для круглой (цилиндрической) заготовки $I = \pi \cdot d^4 / 64$ (мм⁴).

При закреплении заготовки в центрах наибольшее отжатие имеет место посередине заготовки, когда резец находится на этом же участке

$$y_{\text{заг max}} = P_y \cdot l^3 / (48 \cdot E \cdot I), \quad (3)$$

где: l – длина заготовки (мм).

Коэффициент уменьшения наибольшей упругой деформации заготовки при закреплении в центрах по сравнению с консольным закреплением

$$K_{y \text{ центр/ конс}} = y_{\text{заг max центр}} / y_{\text{заг max конс}} =$$

$$= [P_y \cdot l^3 / (48 \cdot E \cdot I)] / [P_y \cdot l^3 / (3 \cdot E \cdot I)] = 3 / 48 = 0,0625. \quad (4)$$

При обработке в центрах заготовки диаметром 50 мм и длиной 200 мм рассчитываем её наибольшую упругую деформацию $y_{\text{заг max}}$ по уравнению (3), т.к. чаще всего на производстве детали типа «вал» обрабатываются в центрах, а наиболее часто используемые размеры заготовки указаны выше:

$$y_{\text{заг max}} = P_y \cdot l^3 / (48 \cdot E \cdot I) = P_y \cdot l^3 \cdot 64 / (48 \cdot E \cdot \pi \cdot d^4) =$$

$$= 500 \cdot 200^3 \cdot 64 / (48 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 50^4) = 0,0012941 \approx 0,001 \text{ мм}$$

Величина упругой деформации заготовки очень мала, но увеличение диаметра заготовки $\Delta d_{\text{упр}}$ из-за действия только силы P_y (рис. 2) будет в два раза больше, т.е. $\Delta d_{\text{упр}} = 2 \cdot y_{\text{заг max}}$.

Рассчитываем наибольшую упругую деформация заготовки $y_{\text{заг max}}$ (посередине длины заготовки) при её закреплении в центрах при разных диаметрах и длине, заносим результаты в таблицу 1.

Таблица 1

Наибольшая упругая деформация цилиндрической заготовки

$y_{\text{заг max}}$ при её закреплении в центрах, мм

Диаметр заготовки d , мм	Длина круглой заготовки		
	$l = 100 \text{ мм}$	$l = 200 \text{ мм}$	$l = 400 \text{ мм}$
1	2	3	4
50	0,00001	0,001	0,009
30	0,0001	0,010	0,080
20	0,0006	0,025	0,404
15	0,002	0,160	1,278
10	0,010	0,809	6,471

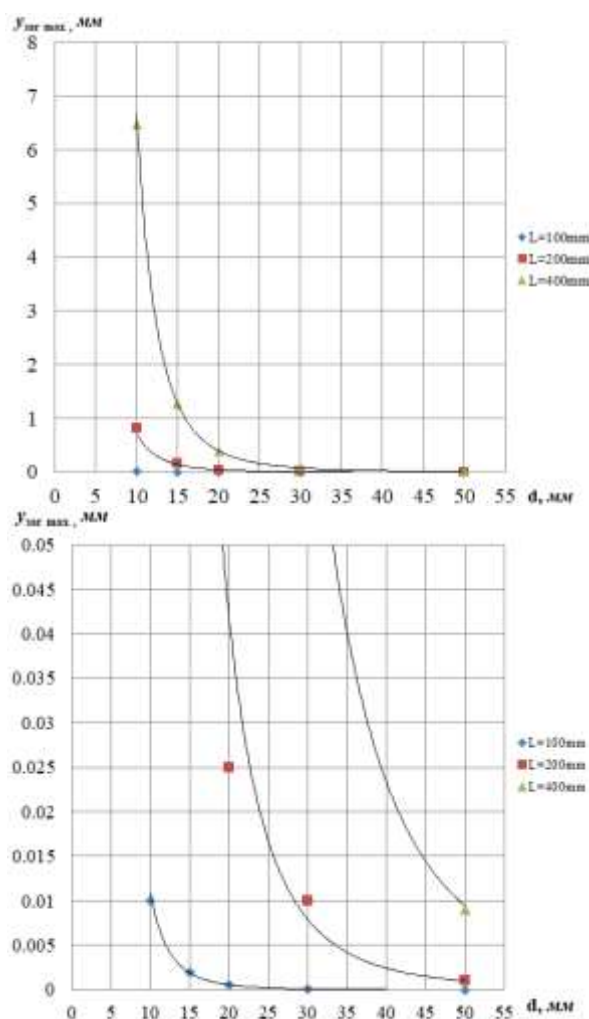


Рис. 3. Влияние диаметра d (мм) и длины заготовки l (мм) на наибольшую упругую деформацию $y_{\text{заг max}}$ (мм) цилиндрической заготовки при её закреплении в центрах: а) большой диапазон изменений $y_{\text{заг max}}$ (от 0 до 7 мм); б) уменьшенный диапазон изменений $y_{\text{заг max}}$ (до 0,05 мм). ♦ - $l = 100$ мм; ■ - $l = 200$ мм; ▲ - $l = 400$ мм.

Жёсткость цилиндрической стальной заготовки при её закреплении в центрах:

$$J_{\text{заг min}} = P_y / y_{\text{заг max}} = (48 \cdot E \cdot I) / l^3 = (48 \cdot E \cdot \pi \cdot d^4) / (l^3 \cdot 64) =$$

$$= (48 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi d^4) / (l^3 \cdot 64). \quad (5)$$

Жёсткость цилиндрической стальной заготовки диаметром 30 мм и длиной 200 мм при закреплении в центрах рассчитываем по уравнению (5):

$$J_{\text{заг min}} = (48 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi 30^4) / (200^3 \cdot 64) = 50\,073,1875 \approx 50\,073 \text{ Н/мм}.$$

В учебниках обычно принимается $J_{\text{заг}} \approx J_{\text{СПИ}} \approx 10\,000 \text{ Н/мм}$ [3, 4], что даже небольшом диаметре заготовки 30 мм не соответствует действительности.

Жёсткость цилиндрической стальной заготовки диаметром 50 мм и длиной 200 мм при закреплении в центрах: $J_{\text{заг min}} = 0,061818 \cdot 50^4 = 386\,367,187 \approx 386\,000 \text{ Н/мм}$, что в 38 раз больше используемой в литературе величины жёсткости заготовки.

Таким образом, при диаметре заготовки более 50 мм, длине менее 200 мм и закреплении в центрах жёсткость заготовки можно не принимать в расчёт, т.е. считать её абсолютно жёстким телом.

При консольном закреплении в патроне упругая деформация заготовки диаметром $d = 30 \text{ мм}$ и длиной $l = 200 \text{ мм}$:

$$y_{\text{заг max}} = P_y \cdot l^3 \cdot 64 / (3 \cdot E \cdot \pi \cdot d^4) = 500 \cdot 200^3 \cdot 64 / (3 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 30^4) \approx 0,16 \text{ мм}$$

При консольном закреплении в патроне упругая деформация заготовки Ø30 мм и длиной 100 мм $y_{\text{заг max}} = 0,01997077 \approx 0,02 \text{ мм}$, а при Ø30 мм и длине 200 мм её жёсткость:

$$J_{\text{заг конс min}} = J_{\text{заг центр min}} \cdot K_{y \text{ центр/конс}} = 50\,073 \cdot 0,0625 = 3129,6 \text{ Н/мм}$$

При консольном закреплении в патроне заготовки Ø30 мм и длиной 100 мм её жёсткость:

$$J_{\text{заг конс min}} = (3 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot d^4) / (l^3 \cdot 64) = (3 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 30^4) / (100^3 \cdot 64) = 25036,6 \text{ Н/мм},$$

т.е. почти на порядок больше, чем жёсткость заготовки длиной 200 мм.

Рассчитываем наибольшую упругую деформация заготовки $y_{\text{заг max}}$ при её консольном закреплении при разных диаметрах и длине, заносим результаты в таблицу 2.

Таблица 2

Наибольшая упругая деформация цилиндрической заготовки

$y_{\text{заг max}}$ при её консольном закреплении, мм

Диаметр заготовки d , мм	Длина круглой заготовки		
	$l = 50 \text{ мм}$	$l = 100 \text{ мм}$	$l = 200 \text{ мм}$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
50	0,0003	0,0026	0,02
30	0,003	0,02	0,16
20	0,013	0,10	0,81
15	0,04	0,32	2,55
10	0,20	1,62	12,93

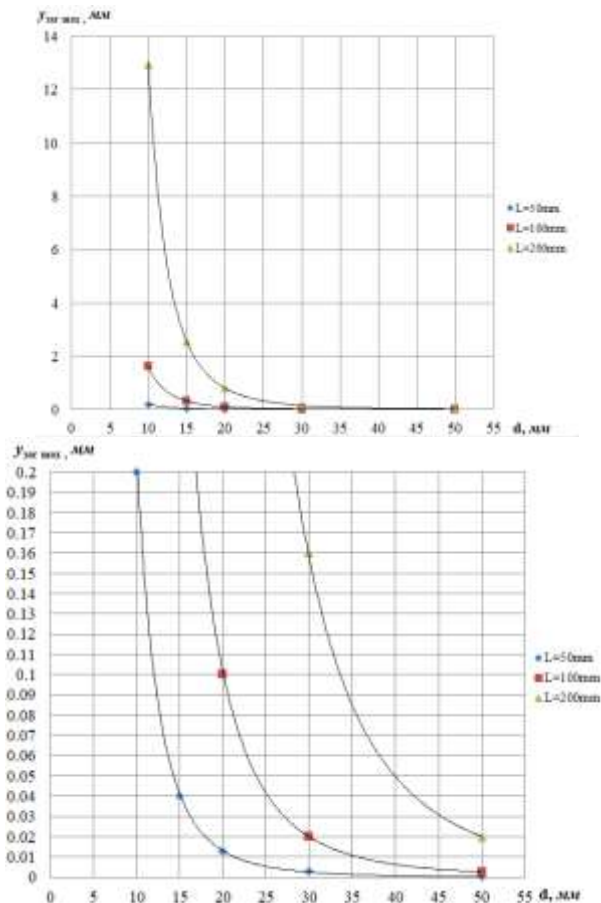


Рис. 4. Влияние диаметра d (мм) и длины заготовки l (мм) на наибольшую упругую деформацию y_{\max} (мм) цилиндрической заготовки при её **консольном** закреплении. а) большой диапазон изменений y_{\max} (до 13 мм); б) уменьшенный диапазон изменений y_{\max} (до 0,2 мм).

♦ - $l = 50$ мм; ■ - $l = 100$ мм; ▲ - $l = 200$ мм.

Из экспериментально полученных нами данных (рис. 2) определяем изменение радиальной составляющей силы резания ΔP_y при изменении длины фаски Δh_f в процессе износа и рассчитываем изменение диаметра заготовки $\Delta d_{\text{упр}}$ по уравнению (1).

Анализ рис. 2 показывает, что на начальном этапе износа ($h_f = 0 - 0,3$ мм) радиальная составляющая силы резания P_y при обработке стали 40Х изменяется незначительно (примерно на 150 Н, или на 21 %). Можно рассчитать изменение диаметра от упругой деформации:

$$\Delta d_{\text{упр}} = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{\text{заг}} + J_{\text{шп}} + J_{\text{резцедр}}) = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{\text{шп}} + J_{\text{резцедр}}) =$$

$$= 2 \cdot 150 / (30\,000 + 5\,000) = 300 / 35\,000 = 0,0086 \approx 0,009 \text{ мм.}$$

При изменении длины фаски износа h_f от 0 до 0,3 мм изменение размерного износа при заднем угле при вершине $\alpha_b = 12^\circ$ рассчитывается как $h_{\text{раз}} = h_f \cdot \operatorname{tg} \alpha_b = 0,3 \cdot 0,213 = 0,064$ мм. Изменение диаметра заготовки только от размерного износа $\Delta d_{\text{раз}} = 2 \cdot h_{\text{раз}} = 2 \cdot 0,064 = 0,128$ мм.

Общее изменение диаметра от упругой деформации заготовки и размерного износа $\Delta d_{\text{общ}} = \Delta d_{\text{упр}} + \Delta d_{\text{раз}} = 0,009 + 0,128 = 0,137$ мм, что соответствует приблизительно допуску 11 квалитета для диаметра от 30 до 50 мм (IT11 = 0,16 мм).

При увеличении длины фаски h_f с 0,6 до 0,9 мм (также на 0,3 мм) изменение радиальной составляющей силы резания более существенно за счёт более интенсивного увеличения радиальной составляющей силы резания P_y (Н) (см. рис. 2) – на 750 Н, что ещё больше увеличит погрешность обработки за счёт упругой деформации, хотя размерная составляющая останется той же.

$\Delta d_{\text{упр}} = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{\text{шп}} + J_{\text{резцедр}}) = 2 \cdot 750 / 35\,000 = 1500 / 35\,000 = 0,04286 \approx 0,043$ мм.

Общее изменение диаметра от упругой деформации заготовки и размерного износа $\Delta d_{\text{общ}} = \Delta d_{\text{упр}} + \Delta d_{\text{раз}} = 0,043 + 0,128 = 0,171$ мм, что также соответствует приблизительно допуску 11 квалитета для диаметра от 30 до 50 мм (IT11 = 0,16 мм).

Т.к. наибольшая доля увеличения диаметра заготовки при износе резца приходится на размерный износ, то рекомендуется уменьшить задний угол при вершине до $\alpha_b = 7^\circ$. В этом случае при том же изменении длины фаски износа h_f от 0 до 0,3 мм изменение размерного износа рассчитывается как $h_{\text{раз}} = h_f \cdot \operatorname{tg} \alpha_b = 0,3 \cdot 0,1228 \approx 0,037$ мм. Изменение диаметра заготовки от размерного износа $\Delta d_{\text{раз}} = 2 \cdot h_{\text{раз}} = 2 \cdot 0,037 \approx 0,074$ мм.

Заключение

1. При закреплении цилиндрической заготовки в центрах изменением диаметра заготовки за счёт упругой деформации заготовки под действием сил резания можно пренебречь при диаметре заготовки более 50 мм и длине менее 200 мм.

2. При закреплении заготовки в центрах и длине заготовки более 200 мм уменьшение диаметра заготовки менее 30 мм приводит к существенной упругой деформации заготовки.

3. При консольном закреплении заготовки и длине вылета более 100 мм уменьшение диаметра заготовки менее 30 мм приводит к существенной упругой деформации заготовки.

4. Основной причиной увеличения погрешности обработки заготовки при её диаметре более 50 мм является размерный износ. Для уменьшения его влияния рекомендуется уменьшить задний угол при вершине до $\alpha = 7^\circ$, что увеличит также прочность режущей пластины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под ред. С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2007. – 528 с.
2. Козлов В.Н., Чжан Ц., Го И., Сабават С.К. Исследование контактных нагрузок при врезании // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. Н. Яковлева. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — с. 315-316.
3. Скворцов В.Ф. Основы размерного анализа технологических процессов изготовления деталей: учебное пособие. 2-е издание. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. -90 с.
4. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя Т. 1. - Москва «Машиностроение», 2003. – 943 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Лю Фан

Научный руководитель: Курганов Василий Васильевич,
к.т.н., доцент ТПУ

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Аннотация: Целью работы является анализ качества переходных процессов для теплового объекта с ПИД-регулятором, коэффициенты которого получены на основе генетического алгоритма и метода с релейной обратной связью. Способ получения коэффициентов на основе генетического алгоритма и метода с релейной обратной связью