

УДК 621.9

Расчетное определение глубины и степени упрочнения деталей из жаропрочных материалов при несвободном течении

Михайлов С. В., Данилов С. Н., Михайлов А. С.

(Костромской государственной технологической академии)

Изложена методика расчета глубины и степени наклепа поверхностного слоя деталей из упрочняемых жаропрочных материалов при несвободном течении

Рабочие процессы в современных машинах характеризуются высокими значениями давлений, нагрузок, скоростей и температур. Обычные конструкционные стали в этих условиях недолговечны или вовсе непригодны, поэтому в машиностроении все большее распространение получают сплавы с высокими показателями прочности, жаропрочности, стойкости против коррозии. Эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от качества поверхностного слоя. Из-за дефектов поверхностного слоя происходит более быстрое накопление повреждений, приводящее к разрушению детали. Применительно к ответственным деталям современных машин, работающим в сложных условиях, под качеством поверхностного слоя понимают шероховатость обработанной поверхности и физико-механические характеристики поверхностного слоя, в первую очередь степень, глубину наклепа и остаточные напряжения [1]. Параметры качества поверхностного слоя могут выступать как критерии оптимизации механической обработки деталей, так и являться важными техническими ограничениями при назначении оптимальных условий резания.

При расчете параметров качества механической обработки жаропрочных пластичных материалов важное значение имеет зависимость напряжения текучести материала σ_s от накопленной деформации e_i . Напряжением текучести σ_s

называется напряжением, вызывающее в условиях линейного напряженного состояния пластическую деформацию при данной величине накопленной деформации. Напряжение текучести изменяется по ходу деформации материала, т.е. является переменной величиной, которую следует отличать от постоянной величины, называемой пределом текучести σ_{s0} , представляющим собой начальное напряжение текучести, т.е. напряжение, при котором возникают пластические деформации в начальный момент деформирования (рис. 1.). Упрочнением (наклепом) называется увеличение напряжения текучести по ходу деформации.

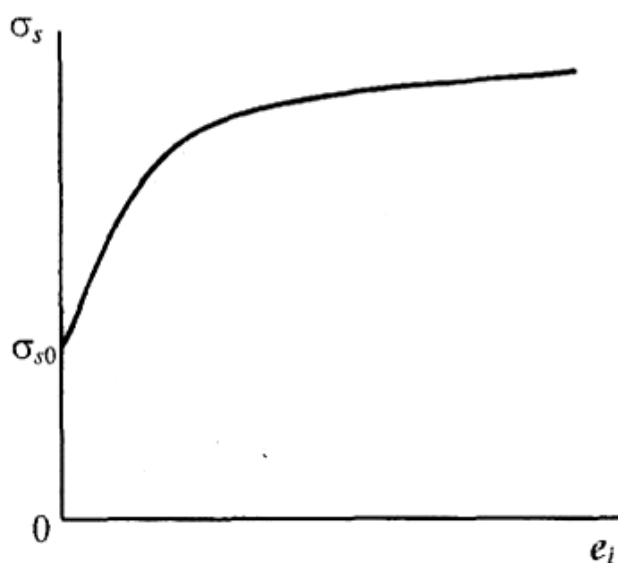


Рис. 1. Типовая экспериментальная кривая упрочнения

Математический анализ процесса стружкообразования при резании упрочняемых материалов выполним с помощью расчетной схемы, показанной на рис.2. Для облегчения будем считать, что имеет место плоское деформированное состояние, т. е. деформация в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа, равна нулю. Это хорошо соответствует несвободному резанию в случае, когда ширина стружки не очень мала по сравнению с толщиной срезаемого слоя. Согласно схеме резец внедряется в материал обрабатываемой заготовки со скоростью v_0 . Возникающий при этом очаг интенсивной пластической деформации заключен в пространстве, ограниченном поверхностью резца на участке OC , а также пунктирными линиями AOB . Форма кривой AO определяет

глубину h_4 упрочненного слоя обработанной поверхности, вышедшей из под резца.

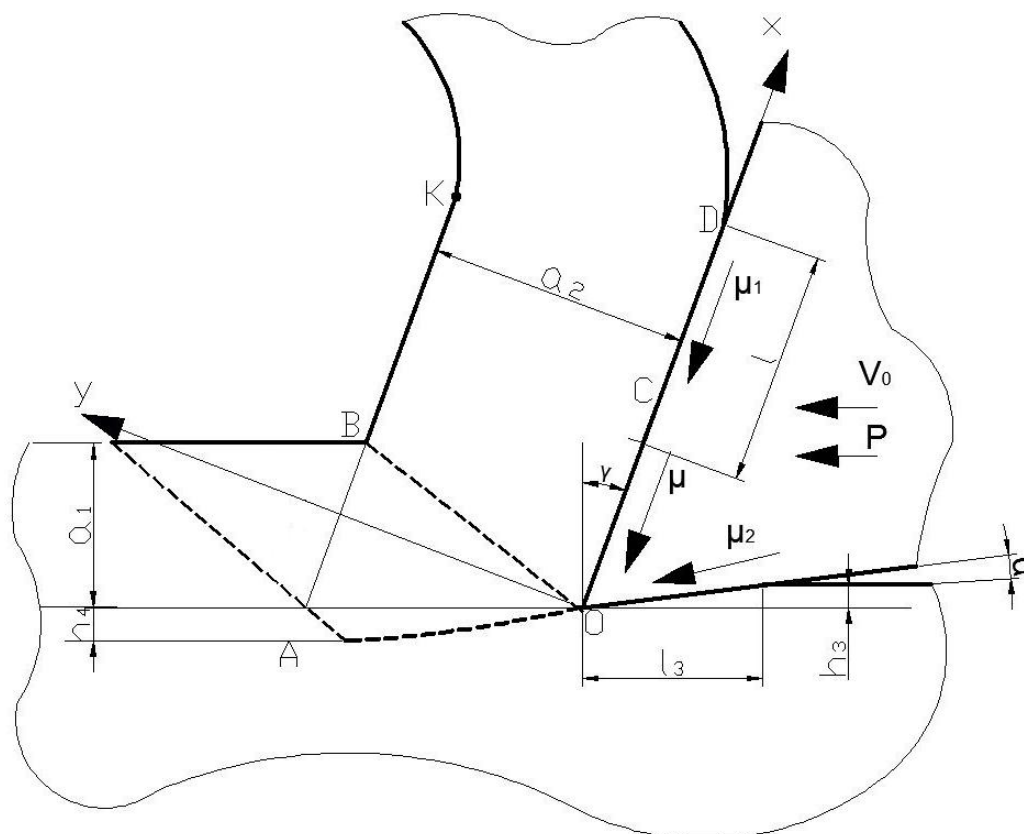


Рис.2. Расчетная схема процесса резания упрочняемых материалов

Точка С делит участок контакта стружки с резцом на пластический и упругий. В области $BOCDK$, расположенной выше верхней границы очага интенсивной пластической деформации, имеют место вторичные упругопластические деформации, обусловленные происходящим выравниванием неравномерно распределенных по толщине стружки внутренних напряжений. В этой области образующаяся стружка контактирует с передней поверхностью резца на некоторой длине l , а выше точки D она отходит от поверхности резца. Когда пластически деформированная зона высотой h_4 оказывается правее острия O резца, происходит ее упругая разгрузка, обуславливающая контакт с задней поверхностью резца на длине l_3 .

Глубину проникновения пластической деформации в обрабатываемую заготовку можно найти из условия равенства нулю суммарной составляющей

скоростей течения, нормальной к границе АО. Упрощенное выражение для расчета глубины проникновения пластической деформации имеет вид [2]

$$h_4 = 1.45(\mu - 0.3)a_2(1 - \sin\gamma) \quad (7.1) \quad (1)$$

где μ – коэффициент пластического трения стружки с инструментом, $a_2 = k_c a_1$ – толщина стружки, k_c – коэффициент укорочения стружки.

При несвободном точении в резании участвует не только главная режущая кромка, но и вспомогательная кромка, дающая дополнительное увеличение глубины и величины наклёпа в зоне обработанной поверхности. Учесть это влияние можно через соотношение сил, действующих со стороны главной и вспомогательной режущих кромок. Как известно, эти силы определяют направление схода стружки. Схема формирования наклепанного слоя при несвободном резании, впервые предложенная Севастьяновым В.Я. [3], показана на рис. 3.

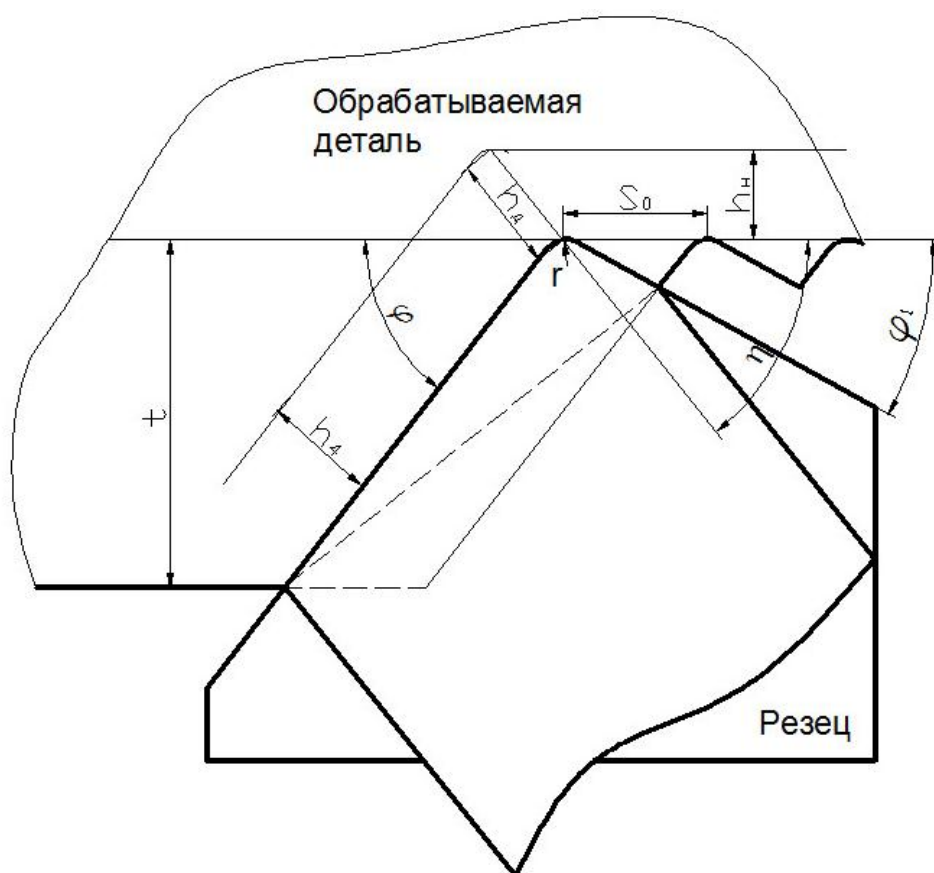


Рис. 3. Схема формирования наклепанного слоя при несвободном резании материалов

Из схемы следует, что для определения остаточной глубины наклепанного слоя при несвободном резании необходимо знать величину угла схода стружки η и глубину пластически деформированного слоя в главной секущей плоскости h_4 или в плоскости схода стружки h_δ

$$h_n = h_\delta \sin \eta \quad (2)$$

где $h_\delta = 1,45(\mu - 0,3) k_c a_{1\delta}(1 - \sin \gamma_\delta)$, $a_{1\delta}, \gamma_\delta$ – толщина срезаемого слоя и передний угол в плоскости схода стружки.

В работе [1] приведены результаты обширных экспериментальных исследований наклепанного слоя обработанной поверхности, которые показали, что на толщину этого слоя и величину наклепа помимо геометрических факторов резания влияет скорость резания, изменяющая коэффициент утолщения стружки и температуру резания. Увеличение температуры резания способствует интенсификации процесса разупрочнения и снижению наклепа. Кроме того, установлено, что подача влияет на наклеп не только как геометрический фактор, увеличение которого повышает глубину наклепа. По данным экспериментов при увеличении подачи температура резания возрастает, а коэффициент трения несколько снижается (при определенных скоростях), что может приводить к уменьшению глубины и степени наклепа.

Для определения возможного упрочнения обработанной поверхности детали (т. е. определения наклепа в области проникновения пластической деформации ниже острия резца) рассчитаем накопленную деформацию в рассматриваемой области в момент ее прохождения за острие резца по формуле [2]:

$$e_i = 2.31s \cos \gamma / a_2 \quad (3)$$

Это выражение позволяет оценить упрочнение обработанной поверхности по кривой упрочнения материала заготовки или по ее аппроксимации. Эпюра накопленных деформаций по глубине наклепа показана на рис. 4. Из нее видно, что наибольшие деформации сосредотачиваются вблизи режущей поверхности инструмента.

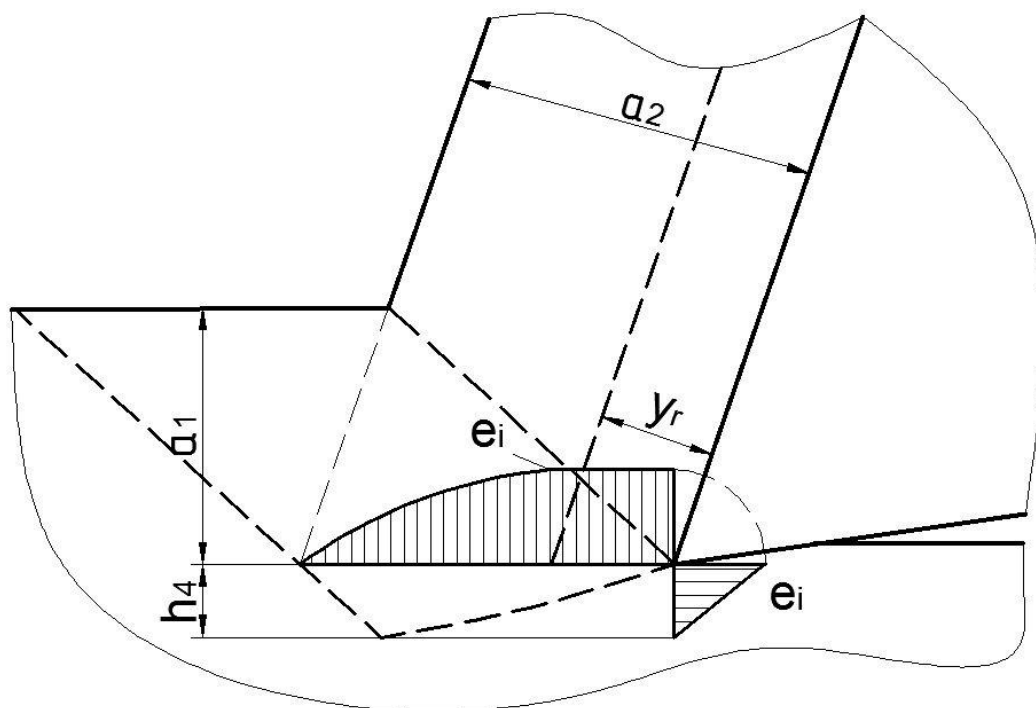


Рис. 4. Распределение накопленных деформаций в очаге интенсивной пластической деформации при резании материалов

Расчетные величины напряжений в этой области могут быть определены по кривым упрочнения, приведенным в справочниках или полученным экспериментальным путем. Если расчетные значения напряжений превышают предел прочности обрабатываемого материала, то велика вероятность появления микротрещин на поверхности обработанной детали.

Глубина наклепанного слоя формируется, главным образом, сжимающим силовым полем от действия силы стружкообразования. Растягивающее силовое поле, возникающее за режущей кромкой инструмента от действия той же силы, многократно меньше. Поэтому растягивающее напряжение хоть и приведет к изменению степени упрочнения поверхностного слоя, но на остаточную глубину наклепа не скажется.

С целью дальнейшего изучения параметров поверхностного слоя обрабатываемого материала установлены зависимости параметров сечения среза, значения угла схода стружки, действительных переднего и заднего углов ин-

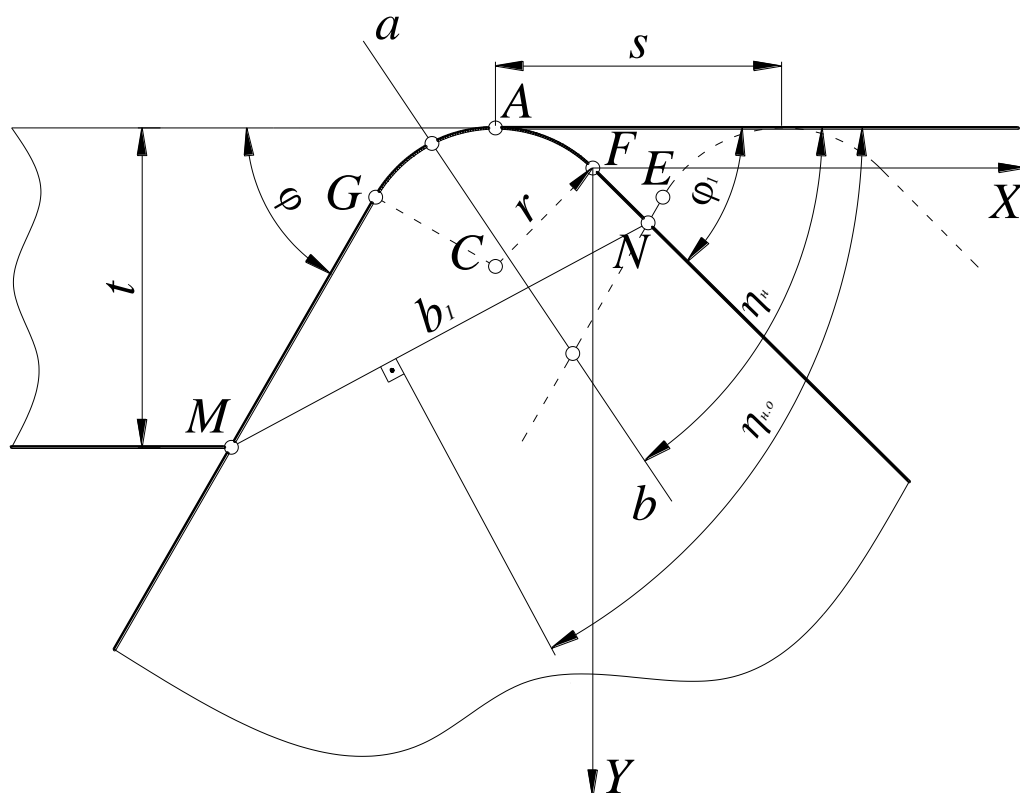


Рис. 5. Графическая модель срезаемого слоя

Координаты опорных точек резца и сечения срезаемого слоя определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_C &= -r \cdot \sin(\varphi_1); & x_G &= x_C - r \cdot \sin(\varphi); \\ y_C &= r \cdot \cos(\varphi_1); & y_G &= y_C - r \cdot \cos(\varphi); \\ x_A &= x_C; \\ y_A &= y_C - r; \end{aligned} \tag{4}$$

Из геометрического анализа графической модели сечения срезаемого слоя установлено, что координаты крайних точек активного участка режущей кромки $M(x_M; y_M)$, $N(x_N; y_N)$ зависят от размера $(t - r + r \cdot \cos \varphi)$ и величины отрезков EN и FN, значения которых находятся по выражениям:

$$EN = \frac{s - r \left(\sin \varphi + \sin \varphi_1 + \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1} \right)}{\sin \varphi / \operatorname{tg} \varphi_1 + \cos \varphi} \quad (5)$$

$$FN = r \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1 \cdot \left[1 + \frac{m - \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_1 \cdot (1 - m^2) + 1}}{(\operatorname{ctg}^2 \varphi_1 + 1) \cdot \sin \varphi_1} \right], \text{ при } r \neq 0; \quad (6)$$

$$FN = \frac{s \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \text{ при } r = 0, \quad (7)$$

где $m = s/r - \sin \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_1 \cdot \cos \varphi_1$; s – подача; r – радиус при вершине инструмента; φ, φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане.

Если снятие припуска осуществляется при условиях, когда $EN \geq 0$, то координаты точки N определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_N &= -r \cdot \sin \varphi_1 + s - r \cdot \sin \varphi - EN \cdot \cos \varphi; \\ y_N &= r \cdot \cos \varphi_1 + EN \cdot \sin \varphi - r \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (8) \quad (9)$$

Если $EN < 0$, то в зависимости от FN расчет ведется по формулам:
при $FN \geq 0$:

$$\begin{aligned} x_N &= FN \cdot \cos \varphi_1; \\ y_N &= FN \cdot \sin \varphi_1. \end{aligned} \quad (10) \quad (11)$$

при $FN < 0$:

$$\begin{aligned} x_N &= -r \cdot \sin \varphi_1 + \frac{s}{2}; \\ y_N &= r \cdot \left(\cos \varphi_1 - \sin \left(\arccos \frac{s}{2 \cdot r} \right) \right). \end{aligned} \quad (12) \quad (13)$$

Координаты точки М находятся из следующих условий:

если $(t - r + r \cdot \cos \varphi) \geq 0$, то

$$\begin{aligned} x_M &= -r \cdot (\sin \varphi_1 + \sin \varphi) - \frac{t - r \cdot (1 - \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi}; \\ y_M &= t - r \cdot (1 - \cos \varphi_1) \end{aligned} \quad (14) \quad (15)$$

если $(t - r + r \cdot \cos \varphi) < 0$, то

$$\begin{aligned} x_M &= -r \cdot \sin \varphi_1 - \sqrt{t \cdot (2 \cdot r - t)}; \\ y_M &= t - r \cdot (1 - \cos \varphi_1) \end{aligned} \quad (16) \quad (17)$$

где t – глубина резания.

Ширина срезаемого слоя определяется по формуле:

$$b_1 = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2} \quad (18)$$

Средние значения параметров зоны резания, в том числе усадка стружки и длина ее контакта с инструментом, рассчитываются через среднее значение толщины срезаемого слоя a_{1cp} :

$$a_{1cp} = \frac{A - \Delta A}{b_1} \quad (19)$$

где $A = t \cdot s$ – номинальное поперечное сечение срезаемого слоя; ΔA – площадь остаточного сечения среза.

В общем случае ΔA определяется по формуле (рис. 6):

$$\Delta A = S_1 + S_2 + S_3 + S_4,$$

где S_1, S_2, S_3, S_4 – площади остаточного сечения среза, образованные прямолинейными и криволинейными участками вспомогательной и главной режущими кромками инструмента.

Расчетные выражения площадей S_1, S_2, S_3, S_4 зависят от соотношений отрезков EN и FN сечения среза, значения которых находятся по формулам (5–7).

при $EN \geq 0$ и $x_G + s - x_N > 0$, то

$$S_4 = (x_C - x_G) \cdot r - \frac{\varphi \cdot r^2 + (x_C - x_G) \cdot (y_C - y_G)}{2} \quad (24)$$

иначе

$$S_4 = (x_C - x_N + s) \cdot r - \frac{\arctg\left(\frac{x_C + s - x_N}{y_C - y_N}\right) \cdot r^2 + (x_C + s - x_N) \cdot (y_C - y_N)}{2} \quad (25)$$

Если $r = 0$, то $S_3 = 0$, $S_4 = 0$.

Выражение для расчета η_H с учетом влияния всех основных технологических факторов имеет вид:

$$\eta_n = \left(\eta_{n.o} - \arctg \left(\operatorname{tg} \lambda \cdot \sin(\eta_{n.o} + \varphi) - \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos(\eta_{n.o} + \varphi) \right) \right) \quad (26)$$

где $\eta_{n.o}$ – угол начального схода стружки, который определяется по формуле:

$$\eta_{n.o} = \arctg \left(\frac{x_N - x_M}{y_M - y_N} \right) \quad (27)$$

Определение значения действительного переднего угла осуществляется по формуле:

$$\gamma_o = \arctg(\cos \zeta \cdot \operatorname{tg} \gamma + \sin \zeta \cdot \operatorname{tg} \lambda) \quad (28)$$

где $\zeta = \eta_n - (\pi/2 - \varphi)$, λ – угол наклона главной режущей кромки, град; γ – главный передний угол инструмента, град.

С целью проверки теории выполнен количественный анализ влияния режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента на глубину наклепанного слоя. Примеры расчетов для двух случаев резания с главными углами в плане $\varphi=70^\circ$ и $\varphi=90^\circ$ представлены на рис. 7–11.

Исходные данные к расчету 1: главный угол в плане $\varphi=70^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1=10^\circ$, передний угол $\gamma=0$, задний угол $\alpha=10^\circ$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda=0$, радиус при вершине $r=0,1$ мм, радиус

округления режущей кромки $\rho = 0,1$ мм, фаска износа на задней грани $h_z: 0,1$ мм, скорость резания $v=60$ м/мин, подача $s=0,1$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм.

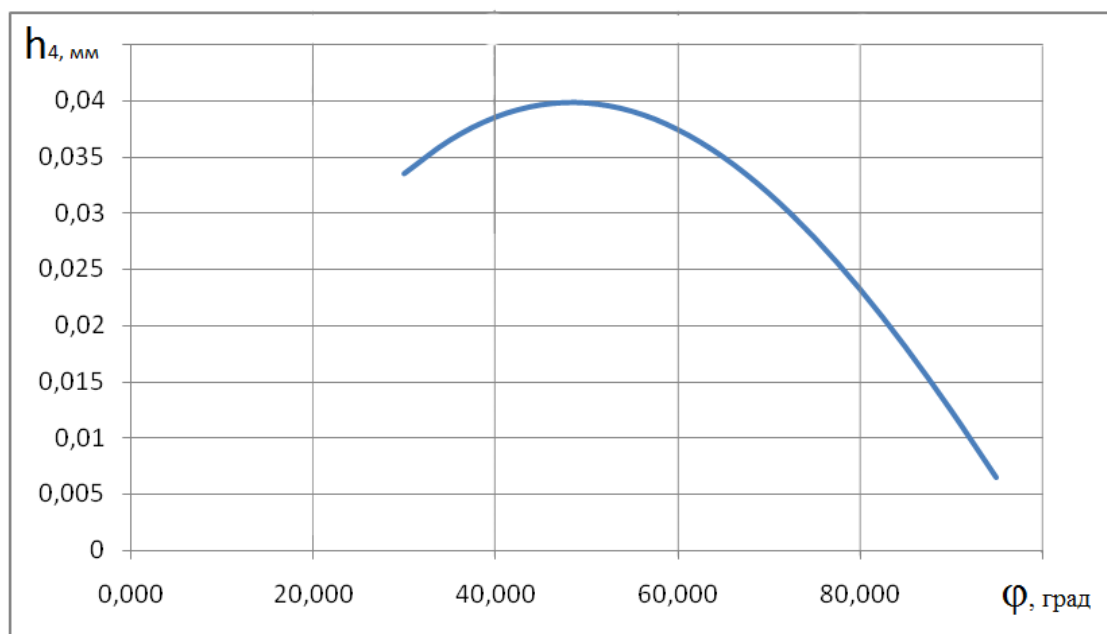


Рис. 7. Влияние главного угла в плане ϕ на глубину наклепа

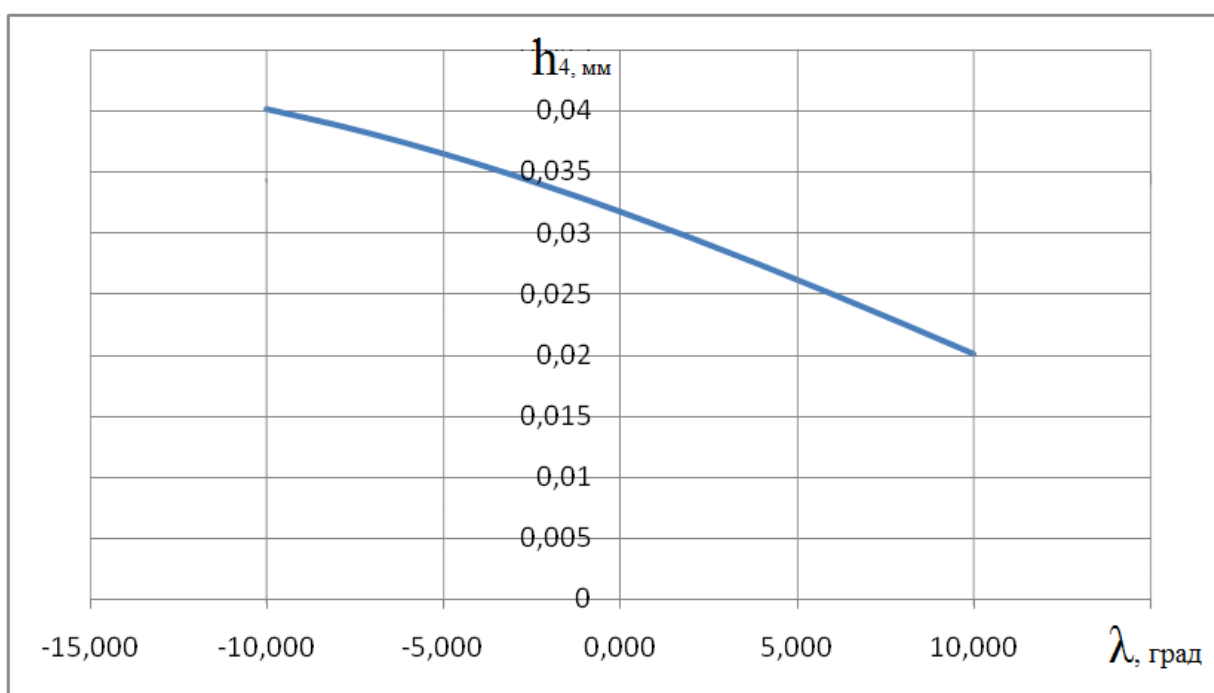


Рис. 8. Влияние угла наклона главной режущей кромки λ на глубину наклепа при $\phi=70^\circ$

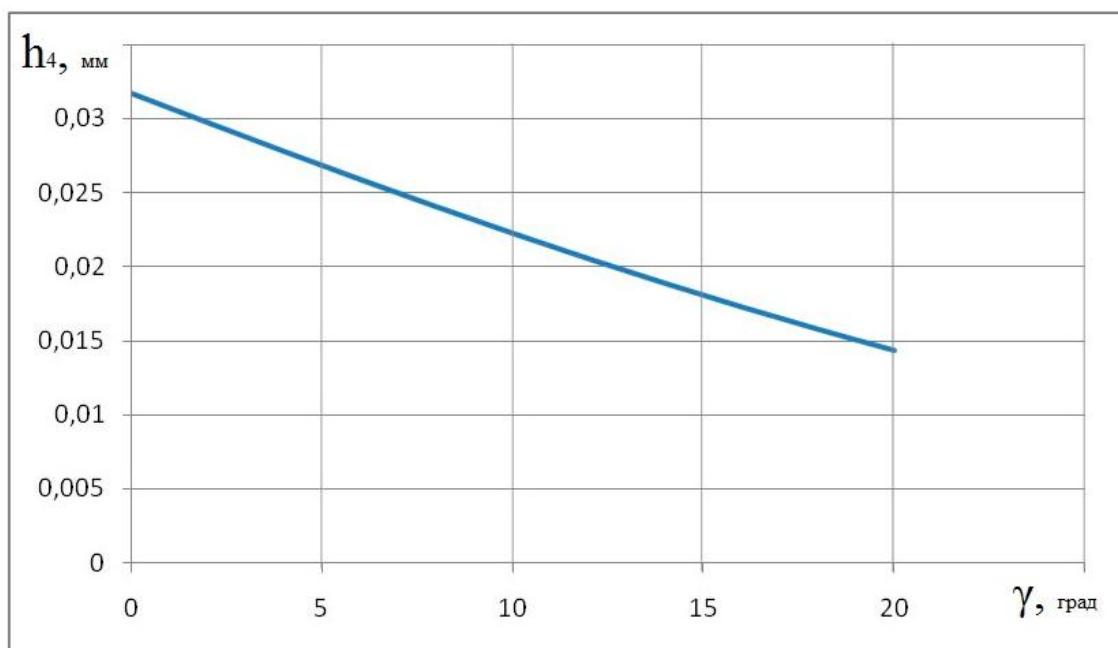


Рис.9. Влияние переднего угла γ на глубину наклепа при $\phi=70^\circ$

Исходные данные к расчету 2: главный угол в плане $\phi=90^\circ$, вспомогательный угол в плане $\phi_1=10^\circ$, передний угол $\gamma=0$, задний угол $\alpha=8^\circ$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda=0$, радиус при вершине $r=0,1$ мм, радиус округления режущей кромки $\rho=0,1$ мм, фаска износа на задней грани $h_3=0,1$ мм, скорость резания $v=60$ м/мин, подача $s=0,1$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм.

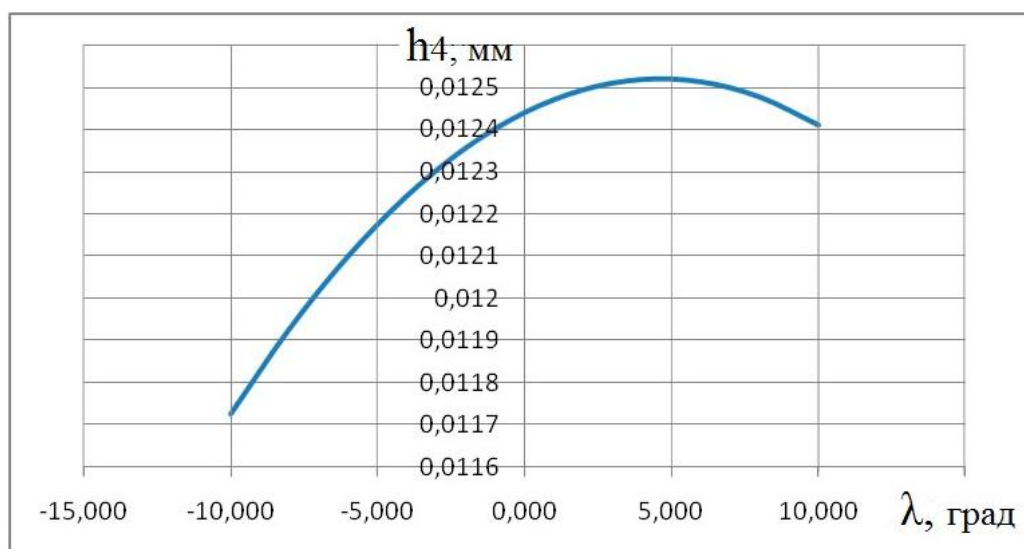


Рис. 10. Влияние угла наклона главной режущей кромки λ на глубину наклепа ($\phi=90^\circ$)

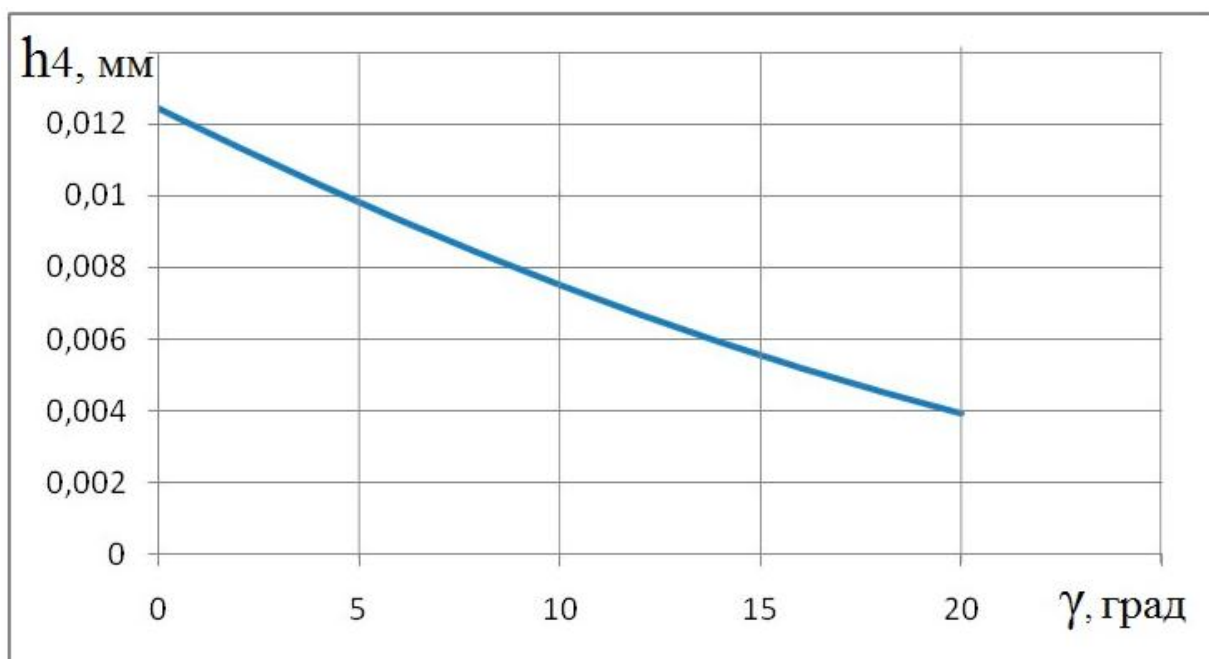


Рис. 11. Влияние переднего угла γ на глубину наклепа ($\varphi=90^\circ$)

Результаты расчета хорошо соответствуют экспериментальным данным. Из геометрических параметров резца на глубину наклепа в наибольшей степени влияют передний угол γ , угол в плане φ , угол наклона главной режущей кромки λ . При резании с углами в плане $\varphi < 90^\circ$ глубина наклепа уменьшается по мере увеличения переднего угла γ , увеличения положительного угла в плане λ и главного угла в плане φ . При $\varphi > 90^\circ$ угол λ оказывает слабое влияние на наклеп, поэтому управление наклепом следует осуществлять с помощью переднего угла инструмента γ . Из режимов резания наибольшее влияние оказывают подача инструмента s и скорость резания v . Для уменьшения глубины наклепа следует стремиться к увеличению скорости резания v и увеличению отношения глубины резания к подаче t/s .

Выводы

С помощью вычислительных экспериментов установлены технологические параметры, оказывающие наибольшее влияние на глубину наклепа. В результате исследований разработаны рекомендации по назначению режимов ре-

зания и геометрии резцов с учетом получения требуемых параметров качества поверхностного слоя.

Литература

1. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012.– 320с.
2. Воронцов А. Л. Новая теория резания / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Абагачиев // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. 2007. – №9.
3. Севастьянов В.Я. Наклеп при обработке металлов резанием / Упрочнение деталей машин механическим наклепыванием. Тр. совещания по упрочнению деталей машин./ М.Наука, 1965г.
4. Михайлов С. В. Математическая модель схода стружки с инструмента / С. В. Михайлов, Д. С. Скворцов // СТИН. – 2004. – №6. – С. 28–31.

Mikhaylov S. V., Danilov S. N., Mikhaylov A. S.