

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТО-ПЕРЕМЕННОМ РЕЗАНИИ

Ю.А. НОВОСЁЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Развитие экономики республики Беларусь, обделённой природой ценными полезными ископаемыми, возможно за счёт эффективного функционирования машиностроительной отрасли, не исключая при этом, конечно, и любые другие возможности. Поскольку стержнем машиностроения является обработка резанием, то её всестороннее совершенствование является, с нашей точки зрения, весьма важной задачей в решении вышеназванных проблем.

Постановка задачи

Лезвийная обработка резанием существует, в принципе, в двух вариантах – она может быть непрерывно-постоянной и прерывисто-переменной. Непрерывно-постоянная обработка, охватывающая такие разновидности резания, как обтачивание, сверление, зенкерование, развёртывание, протягивание др., появилась значительно раньше. С её помощью достаточно просто изготавливается наибольшее количество деталей машин однотипной (круглой) формы. Поэтому она хорошо исследована и в её практическом использовании существенных проблем не возникает. Почти в противоположном состоянии находится прерывисто-переменная обработка, к которой относятся такие её виды, как фрезерование различных поверхностей, зубофрезерование, шлицефрезерование, круговое фрезерование тел вращения, эксцентричное точение, фрезоточение [1] и др. Её особенность состоит в том, что в ней резание происходит с частыми перерывами, сечение срезаемого слоя и все другие характеристики процесса резания претерпевают резкие периодические изменения от нуля до какого-то максимального значения (или наоборот). Изменение сил резания при этом приводит к возникновению вибраций в процессе обработки, снижению качества обработанной поверхности и точности получаемых размеров, к выкрашиванию режущей кромки лезвий из хрупкого инструментального материала и в результате к снижению стойкости инструмента, к увеличению зазоров и люфтов в технологической системе обработки резанием и к некоторым другим вытекающим отсюда последствиям. Известные исследования отдельных аспектов прерывисто-переменного резания [1]–[4] так в должной мере и не вскрыли его физические и технические особенности.

Тем не менее, как нам кажется, прерывисто-переменное резание, по сравнению с непрерывно-постоянным, обладает рядом преимуществ. Этим методом можно получать большое количество самых разнообразных по форме поверхностей, в том числе и с трёхкоординатной функциональной сложностью, что составляет наибольшую проблематику современного машиностроения. В этом случае лезвие инструмента, вращаясь со скоростью резания, находится в контакте с заготовкой очень короткое время (сотые доли секунды), значительно меньше нагревается и,

хорошо вентилируясь при этом, довольно быстро остывает до начала очередного контакта с заготовкой. Это должно привести к более низкой температуре инструмента и, как следствие, к более высокой его температурной стойкости по сравнению с токарными резцами.

Учитывая все вышеприведенные обстоятельства, а также и то, что качество обработанной поверхности при обработке резанием определяется характером протекания деформационных процессов, нами были исследованы важнейшие показатели процесса стружкообразования при прерывисто-переменном резании, а именно, длины контакта стружки с передней и задней поверхностями лезвия инструмента (ℓ_n и ℓ_z) и коэффициент усадки стружки (K_a). Именно они так или иначе определяют напряжённость процесса резания, степень пластической деформации обрабатываемого материала, а в итоге и качественные показатели процесса резания.

Методика исследования

Главной задачей данных исследований явилось выявление внутренних закономерностей процесса стружкообразования при прерывисто-переменном резании с учётом предполагаемой их изменчивости от угла поворота лезвия в пределах дуги контакта (в пределах одного реза).

Для этого был спроектирован и изготовлен специальный экспериментально-исследовательский инструмент (рис. 1). Он состоит из массивного корпуса 1, в прямоугольном сквозном пазу которого устанавливаются два режущих зуба 4, стягиваемые в осевом направлении винтом 7 между дисками 6 и зажимаемые в корпусе двумя клиньями 3 с помощью винтов 2. Для повышения радиальной жёсткости инструмента и получения возможности выставления зубьев в радиальном направлении после переточки (с целью обеспечения постоянства диаметра) под зубья укладываются две металлические подкладки 5 одинаковой толщины. Два зуба нужны для зажатия между ними терморпары при последующих исследованиях. Зубья выполнялись как цельными из быстрорежущей стали Р6М5, так и напайными с пластинами из твёрдого сплава ВК8. Основные исследования проводились однозубым инструментом, но 6 гнезд в нём предусмотрены для исследования процесса резания многозубым инструментом с 2-мя, 3-мя и 6-ю зубьями. В экспериментах использовались заготовки в форме пластин из Ст.20 и алюминиевого сплава Д16. Исследования показателей процесса резания проводились при изменяющихся глубине резания t (в производственном понимании), подаче на зуб s_z и скорости резания v .

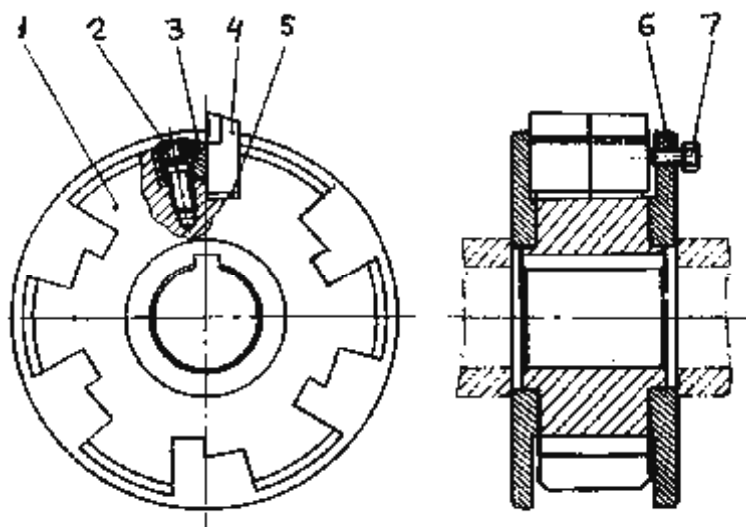


Рис. 1. Экспериментальный инструмент

С целью визуализации формы и размеров площадок контакта лезвия инструмента со стружкой и заготовкой использовался известный [5] метод нанесения на металлическую поверхность тончайшей окрашивающей электролитической плёнки. Предварительные эксперименты подтвердили предположение об изменяемости деформационных процессов в пределах одного реза, т. е. от угла μ поворота лезвия инструмента. Поэтому была поставлена задача установить закон этого изменения.

Чтобы не проводить множество трудоёмких экспериментов по установлению конкретного закона изменения длин площадок контакта лезвия инструмента ℓ_n (на передней поверхности) и ℓ_z (на задней поверхности) от различных значений глубины резания t , было принято решение определять зависимость $\ell_n = f(\mu) = \varphi(t)$ за один опыт с использованием только одной заготовки в этом опыте, у которой обрабатываемая поверхность выполнялась наклонной под некоторым углом ψ к оси инструмента. На рис. 2 в аксонометрии представлена схема определения искомой зависимости и результат эксперимента. При обработке такой заготовки режущая кромка KL формирует поверхность резания $CMED$, начиная с линии CD на обработанной поверхности и заканчивая точкой E на выходе зуба из контакта. Точка K режущей кромки KL , коснувшись точки C на заготовке, тут же выходит из контакта с ней, поэтому длина контакта передней поверхности лезвия с заготовкой в этой точке $\ell_n(\mu) = 0$. Точка M режущей кромки выходит из контакта с заготовкой позже (при угле μ от начала реза), поэтому в ней длина контакта ℓ_n равна отрезку MP . К этому моменту на передней поверхности лезвия сформируется площадка контакта в форме трапеции $KLSP$ (заштрихованная фигура) с криволинейной стороной KP . В момент выхода точки L режущей кромки из контакта с заготовкой (в точке E) длина контакта ℓ_n будет максимальной, равной отрезку LQ . Таким образом на передней поверхности лезвия инструмента образуется вытертой стружкой отпечаток в форме криволинейного треугольника $KPQL$, косвенно представляющий собой линейно трансформированную вдоль режущей кромки (по координате x)

искомую зависимость (фотография передней поверхности с отпечатком косвенной зависимости ℓ_n от μ на рис. 2 получена при обработке алюминиевого сплава Д16).

Последовательно измеряя на инструментальном микроскопе ординаты отпечатка ℓ_n при любых значениях абсциссы x и пересчитывая последние (абсциссы) в значения угла поворота инструмента μ по формуле

$$\mu = \arccos\left(1 - 2 \operatorname{tgsh} \frac{x}{D}\right),$$

где D – диаметр инструмента, получали в результате соответствующей математической обработки искомую функциональную зависимость $\ell_n = f(\mu)$. Длина контакта по задней поверхности ℓ_3 определялась непосредственным измерением на микроскопе.

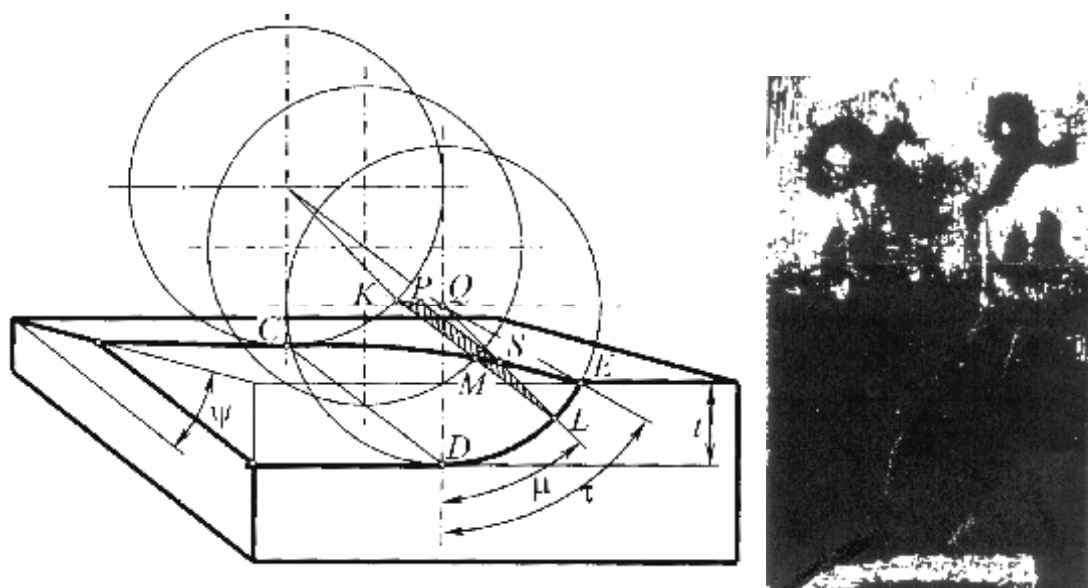


Рис. 2. Схема определения зависимости $\ell_n = f(\mu) = \varphi(t)$ и экспериментальный её отпечаток

Степень пластической деформации обрабатываемого материала при резании, как известно, оценивается коэффициентом усадки стружки по её толщине K_a . Однако поставленная нами задача выявить характер изменяемости коэффициента усадки K_a от угла поворота в пределах дуги контакта привела к большим техническим затруднениям, т. к. измерить толщину стружки практически можно только в конце процесса резания, когда она полностью отделится как от заготовки, так и от лезвия инструмента. Кроме того, определённно можно измерить только максимальную толщину стружки, которая соответствует максимальному значению толщины срезаемого слоя, а во всех других более тонких местах стружки измерение её толщины становится неопределённым (бесполезным), т. к. остаётся неизвестной толщина срезаемого слоя, из которой данная толщина стружки образовалась.

В результате долгих поисков решения данной проблемы выход был всё-таки найден. Он заключался в следующем. Для установления зависимости коэффициента усадки стружки K_a от угла μ поворота лезвия в пределах контакта с заготовкой было принято решение обрабатывать одну и ту же заготовку с 7-ю различными глубинами

резания, которые принимали значения: 0,25; 1,00; 2,2; 3,9; 6,10; 8,7 и 11,7 мм, что конкретно соответствовало следующим значениям угла поворота зуба фрезы: 5°; 10°; 15°; 20°; 25°; 30° и 35°. Собранные с каждого опыта стружки по несколько штук заливались эпоксидной смолой с гексаметилендиамином в качестве отвердителя в пропорции 1:4 в бумажные цилиндры размером \varnothing 12 мм x 12 мм. Приготавливались шлифы продольного сечения стружек и фотографировались совместно с масштабной линейкой для получения реального представления о размерах стружек (рис. 3), затем фотографии увеличивались до значительных размеров. Измеряя курвиметром по приконтактной поверхности стружек их длины с учётом масштаба увеличения, по специально разработанной методике определяли коэффициенты усадки стружек для разных положений лезвия в пределах угла контакта с заготовкой и строили графики зависимости коэффициента усадки от угла μ .



Рис. 3. Фотографии сечения стружки при различных глубинах резания

Результаты исследований

В ходе эксперимента было замечено, что характер изменения толщины стружки вдоль её длины неадекватен характеру изменения толщины срезаемого слоя α_μ . Неожиданным оказался тот факт, что при нулевой толщине срезаемого слоя в начале реза начальная толщина стружки имеет не нулевое, а довольно большое значение (рис. 4). Это натолкнуло на мысль о том, что в пределах одного реза процесс деформирования металла существенно изменяется. Кроме того было замечено, что форма наружной (приконтактной) поверхности стружки в продольном её сечении (см. фото) напоминает логарифмическую спираль. Это обстоятельство также явилось неожиданностью, т. к. толщина срезаемого слоя α_μ , которая образует толщину стружки и казалось бы определяет её форму, изменяется не по логарифмической спирали, а по синусоиде

$$\alpha_\mu = s_z \cdot \sin \mu, \quad (1)$$

где s_z – подача на зуб, мм/зуб; μ – текущий угол контакта зуба с заготовкой от начала реза, град.

Проведенный математический анализ формы продольного сечения приконтактной поверхности стружки путём точного графического определения базовых параметров предполагаемых логарифмических спиралей, построения по ним этих кривых для большого количества конкретных стружек и прорисовки их на увеличенных фотографиях самих стружек показал (расчётная схема на рис. 4) весьма высокую точность предполагаемой закономерности (максимальные отклонения в отдельных местах не превышают 5–7 %). По-видимому завивание стружки по

логарифмической спирали является важным внешним отражением каких-то не раскрытых ещё сложных внутренних деформационных процессов при образовании стружки в условиях прерывисто-переменного резания. Оставляя это обстоятельство в стороне, перейдём к рассмотрению зависимости коэффициента усадки стружки по толщине K_a от угла μ поворота лезвия инструмента в пределах одного реза.

Такого вида зависимостей никто ещё не получал в силу практической невозможности определения в аналогичных процессах резания толщины стружки в любой интересующий нас момент нахождения лезвия инструмента на дуге контакта с заготовкой (в пределах одного реза).

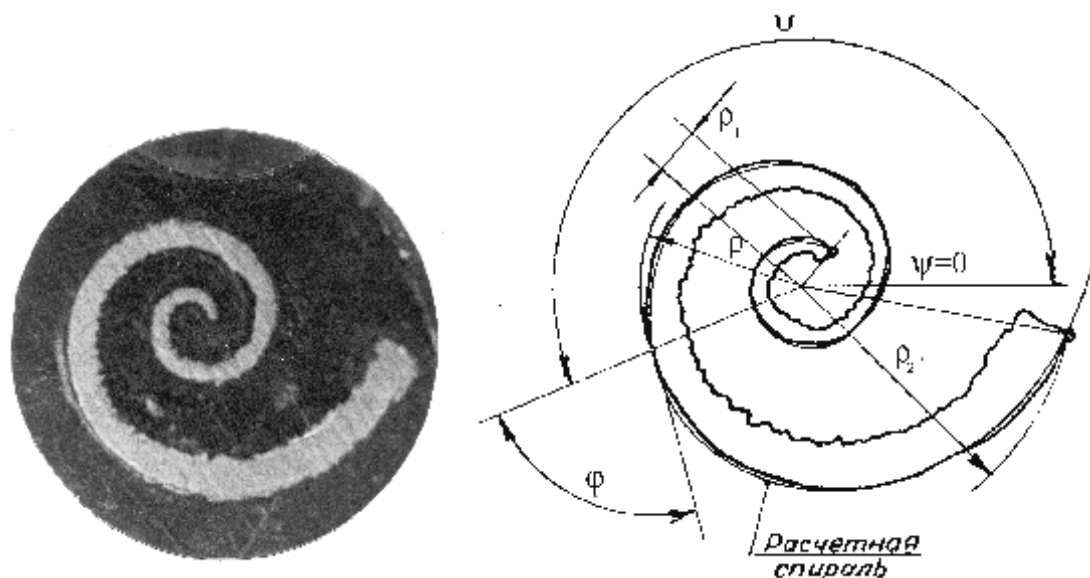


Рис. 4. Фотография и схема расчётного анализа продольного сечения стружки

Для решения этой задачи нами был разработан и применён оригинальный метод, заключающийся в следующем. Развернём мысленно крутой завиток стружки и превратим его в прямолинейную стружку, как это имеет место, например, при строгании или точении. Проследим за процессом формирования такой стружки от начала её образования до конца и сопоставим его с процессом удаления срезаемого слоя, из которого она образуется (рис. 5). Если лезвие инструмента из положения, определяемого углом μ , повернётся на элементарный угол $d\mu$, то при этом заштрихованный элемент срезаемого слоя толщиной a_μ перейдёт в стружку и вызовет приращение уже снятого её участка длиной l_1 на величину dl_1 . Толщина стружки в этот момент будет a_{l_1} . Полную длину стружки обозначим l_c . Объём срезаемого элемента с учётом измерения $d\mu$ в градусах определяется по формуле

$$dV = \frac{\pi \cdot D}{360^\circ} \cdot d\mu \cdot a_\mu \cdot b,$$

а приращение объёма стружки за счёт перехода в него элемента срезаемого слоя выражается соотношением

$$dV_1 = dl_1 \cdot a_{l_1} \cdot b_1,$$

где b – ширина срезаемого (удаляемого) слоя, мм; b_1 – ширина стружки, мм.

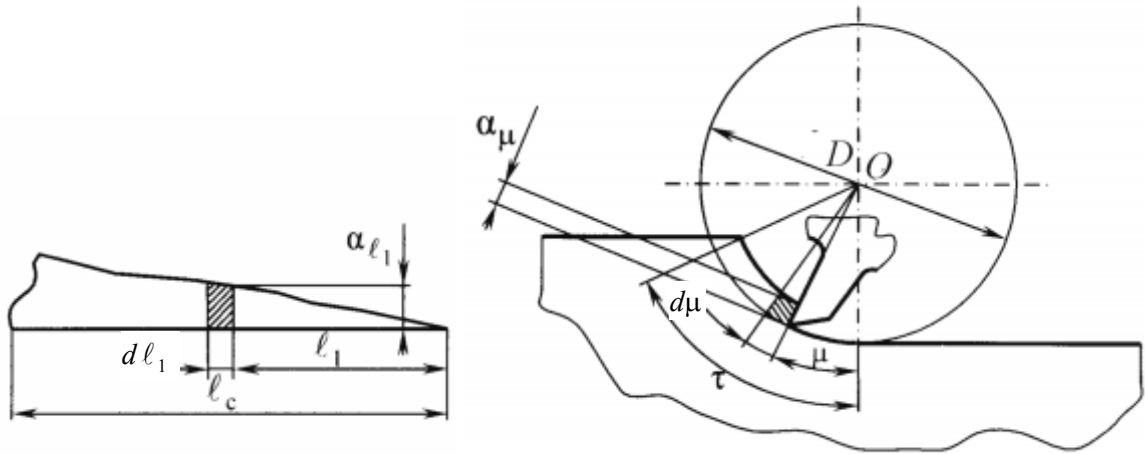


Рис. 5. Схема формирования элементарного объема стружки из элементарного объема срезаемого слоя

Поскольку указанные объемы равны, то

$$\frac{\pi \cdot D}{360^{\circ}} \cdot d\mu \cdot a_{\mu} \cdot b = dl_1 \cdot a_{l_1} \cdot b_1, \quad (2)$$

где D – диаметр инструмента.

Выражение $\frac{\pi \cdot D}{360^{\circ}} \cdot d\mu$ есть не что иное как элементарный путь $d\ell$, проходимый лезвием инструмента по дуге контакта за время деформирования заштрихованного на рис. 5 элемента срезаемого слоя, т. е.

$$d\ell = \frac{\pi \cdot D}{360^{\circ}} \cdot d\mu. \quad (3)$$

Тогда на основании равенства (2) с учётом соотношения (3) будем иметь

$$\frac{d\ell}{d_{l_1}} = \frac{a_{l_1}}{a_{\mu}} \cdot \frac{b_1}{b}. \quad (4)$$

В правой части равенства (4) стоят известные соотношения, именуемые соответственно коэффициентами усадки по толщине $K_a(\mu) = \frac{a_{l_1}}{a_{\mu}}$ и по ширине

$K_b = \frac{b_1}{b}$. Следовательно, левая его часть есть не что иное как мгновенный коэффициент усадки рассматриваемого стружечного элемента по длине, т. е.

$$K_{\ell}(\mu) = \frac{d\ell}{d_{l_1}}. \quad (5)$$

В связи с тем, что деформация стружки по её ширине практически отсутствует, примем коэффициент усадки по ширине равным 1 ($K_b = 1$), тогда получаем равенство

$$K_{\ell}(\mu) = K_a(\mu). \quad (6)$$

Равенство (6) несколько упрощает ситуацию, говоря о том, что если известен коэффициент усадки $K_a(\mu)$, то по нему можно судить и о коэффициенте усадки $K_\ell(\mu)$. Однако в реальности всё не так просто – ведь коэффициент усадки $K_a(\mu)$ является внутренней (закрытой, непознаваемой) характеристикой и определение его экспериментальным путём невозможно. Пришлось изыскивать другой путь. Выход из этого положения был найден следующим образом.

Вернёмся к соотношению (5) и подставим в него вместо $d\ell$ его выражение из (3):

$$K_\ell(\mu) = \frac{\pi \cdot D}{360^\circ} \cdot \frac{d\mu}{d\ell_1} = \frac{\pi \cdot D}{360^\circ} \cdot \frac{1}{d\ell_1/d\mu}.$$

Учитывая, что знаменатель второй дроби есть частная производная от длины стружки по углу поворота, т. е. $\frac{d\ell_1}{d\mu} = \ell'_1(\mu)$, в итоге будем иметь

$$K_\ell(\mu) = \frac{\pi \cdot D}{360^\circ} \cdot \frac{1}{\ell'_1(\mu)}. \quad (7)$$

Выражение (7) приводит к уникальному выводу: изменяемость степени пластической деформации срезаемого слоя в пределах одного реза, т. е. коэффициента усадки стружки $K_\ell(\mu)$, при прерывисто-переменном резании можно исследовать с помощью производной по углу μ от экспериментальной зависимости длины стружки от этого угла в пределах дуги контакта. Производную от экспериментальной функции можно получить только графическим её дифференцированием, что и было сделано.

Именно с этой целью и были проведены экспериментальные исследования длин стружек при различных величинах снимаемого слоя по описанной выше методике. Обработка и измерение длины каждой стружки по приконтактной поверхности на увеличенной фотографии ее шлифа позволила построить кривые зависимости длин стружек ℓ_{c1} от угла μ в достаточно широком диапазоне изменения элементов режима резания. Далее путем графического дифференцирования этих зависимостей и последующих расчётов по ним получали искомые зависимости $K_\ell(\mu)$. Результаты таких построений представлены комбинированной диаграммой на рис. 6 для 4-х опытов серии скоростей (восходящие кривые с правой ординатной шкалой – это зависимости длин стружек ℓ_c от угла μ ; нисходящие кривые с левой ординатной шкалой – это зависимости рассчитанных значений коэффициента усадки K_ℓ также от угла μ).

Из графиков на рис. 6 видно, что коэффициент усадки стружки (степень пластической деформации срезаемого слоя) существенно изменяется в начальный момент резания (при изменении угла поворота μ в пределах $0-10^\circ$) и в этом же периоде резания наиболее ярко проявляется влияние элементов режима резания (в частности, скорости резания v). Высокая (почти семикратная) степень пластической деформации срезаемого слоя объясняется тем, что резание начинается номинально с нулевой толщины срезаемого слоя, в то время как режущая кромка лезвия не имеет идеальной остроты и представляет собой некоторое округление цилиндрической формы между передней и задней его поверхностями. В силу этого лезвие своим

округлением избегает на тончайший клин срезаемого слоя, проворачивается вхолостую без резания в пределах до 5° , вызывая тем самым большие контактные силы взаимодействия и значительное удельное давление на обработанную поверхность заготовки, приводя её в свою очередь к большому поверхностному пластическому деформированию (наклёпу), возникновению остаточных напряжений и микроразрушений в поверхностном слое детали, а также к износу лезвия инструмента. И только тогда лезвие врежется в срезаемый слой и начинается нормальное резание, когда радиус его округления станет соизмеримым с потенциально накопленной в упругом режиме работы толщиной срезаемого слоя, а силы резания будут достаточными для этого резания.

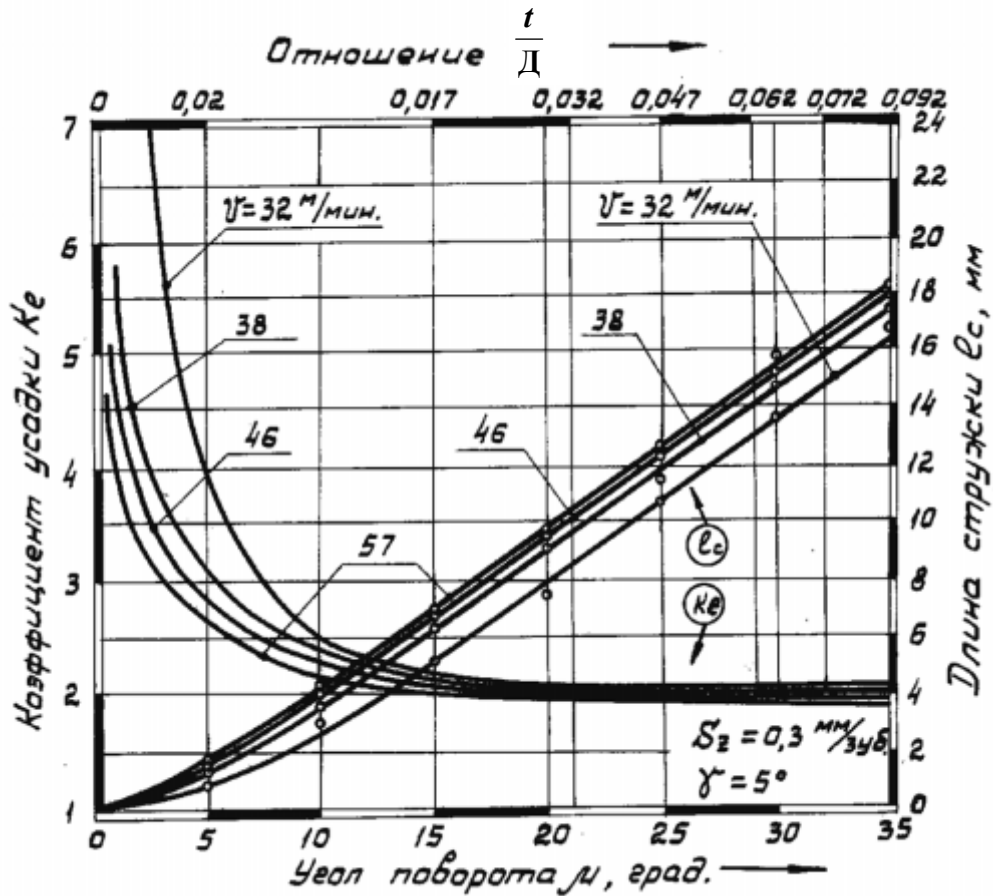


Рис. 6. Диаграмма изменения от угла μ длины стружки ℓ_c и коэффициента усадки K_ϵ

Выводы

Обработка в условиях прерывисто-переменного резания при изменении толщины срезаемого слоя от 0 до максимального значения (встречное резание) для получения обработанных поверхностей с высокими качественными характеристиками мало приемлема. Однако она может вполне и с успехом использоваться для предварительной обработки деталей в тяжёлом машиностроении, когда качество больших поверхностей не является актуальным. Кроме того, если изменить направление вращения инструмента на обратное, то характер самого процесса резания изменится на противоположный. В этом случае данный процесс становится весьма эффективным, т. к. резание будет начинаться с максимальной толщины срезаемого слоя, а заканчиваться нулевой толщиной в районе формируемой лезвием

обработанной поверхности. При этом все динамические и другие характеристики процесса резания на выходе лезвия из контакта с последней плавно уменьшаются до нуля, обеспечивая тем самым помимо высокой производительности обработки также и высокое качество обработанной поверхности.

Именно такой способ прерывисто-переменного резания необходимо изучать, развивать и широко применять в машиностроении.

Литература

1. Новосёлов Ю. А. Способ прерывистого резания. А. с. № 228463; опубл. 23.07.68.
2. Новосёлов Ю. А. Прерывистое резание с переменным сечением срезаемого слоя (фрезоточение) / Ю. А. Новосёлов, Н. Н. Попок // Машиностроение. – 1979. – Вып. 3.
3. Ящерицын П. И. Кинематические особенности фрезоточения деталей из труднообрабатываемых материалов / П. И. Ящерицын, Ю. А. Новосёлов, Н. Н. Попок // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки и повышения надёжности и долговечности изделий: тез. докл. 2-й Всесоюзной науч.-техн. конф. – Запорожье, 1983.
4. Новосёлов Ю. А., Попок Н. Н. Оптимизация геометрических параметров инструмента для фрезоточения / Ю. А. Новосёлов, Н. Н. Попок // Машиностроение. – 1985. – № 6.
5. Петров А. С. Химия – художник / А. С. Петров // Юный техник. – 1953. – № 9.

Получено 23.06.2005 г.