

# РАЗВИТИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ И РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

И. КАЛАСИ

Кафедра технологии машиностроения, Будапештского технического университета

Поступило: 2 марта 1977 г.

Со времени первых публикаций всемирно признанных пионеров исследования обработки резанием И. А. Тиме [1], К. А. Зворыкина [2] и В. Ф. Тейлора [3] прошло уже сто лет. За 30 лет, истекших с конца второй мировой войны, начальные единичные исследования увеличились в несколько раз. Несмотря на это, в области обработки металлов резанием мало таких проблем, которые потребовали и расходовали бы столь много умственных энергий и издержек, как научное определение обрабатываемости металлов и режущей способности резцов.

Бурный рост производства, новые техники, как решение обработки все новых конструкционных материалов ракетной техники, атомной техники и других заставляет машиностроение неизбежно вовлечь в исследование этой проблемы еще больше сил. Это подтверждается фактом, что несколько лет назад совместная работа была начата в международном масштабе в двух направлениях. ЦИРП организована отдельная рабочая комиссия, которая смогла опубликовать первую сводку для оценки своей работы только в 1970 г. [4].

В интересах сопоставления экспериментальных работ, проводимых в международном масштабе, рабочий комитет № 29 международного органа по стандартизации ИСО после четырехлетней работы в настоящее время представил странам-членам предложение, касающееся методов испытаний обработки резанием, выполненных однолезвийными инструментами, но его все еще нельзя считать завершающим эту тему [5].

Научно-исследовательские институты Венгерской Народной Республики доставляют данные обоим международным работам. То, что они могут участвовать в этой работе, объясняется тем, что с пятидесятых годов освоили методы и достижения, в том числе и прежде всего, методы и достижения советских исследователей, таких, как Даниелян [6], Исаев [7], Лоладзе [8] и других, их применяли и развили дальше на основании своего опыта.

Развитие развертывающегося исследования снятия стружки в Венгрии происходило аналогично с развитием, наблюдаемому и в других странах мира.

Крайне интересно, что бывший профессор Будапештского технического университета Шандор Рейтё в своем учебнике, написанном в 1919 г. [9], анализирует определение усилия резания и режущего усилия на основании публикации Санкт-Петербургского профессора Тиме, появившейся на французском языке, а вопросы стойкости режущего инструмента и обрабатываемости демонстрирует изложением работы Тейлора и Валлихса [10], опубликованной на немецком языке. В период между двумя мировыми войнами заслуживает внимания деятельность до сегодня еще активного исследователя, профессора Ласло Казинци [11], исследовавшего образование корня стружки. Затем в начале пятидесятых годов профессор Хорнунг с огромной работоспособностью, путем синтеза международных публикаций, написал первый наш отечественный университетский учебник на тему обработки резанием [12]. При создании этого учебника он до 60% опирается на творчество советских исследователей. С его мнением связано в нескольких институтах начало исследовательских работ по обработке резанием и расширение этих работ после второй мировой войны.

Среди промышленных и университетских исследовательских пунктов Венгрии, занимающихся вопросами обрабатываемости, значительное место занимает кафедра технологии машиностроения Будапештского технического университета, где на эту тематику с 1956 г. составлено три кандидатских диссертации [13, 14, 15]. На этой кафедре вопросы обрабатываемости, а также режущей способности занимают переднее место и среди исследовательских тем. В дальнейших мы намерены дать отчет о скромных результатах, достигнутых в рамках упомянутых работ.

## 1. Проблемы обрабатываемости

Из-за сложных зависимостей обработки резанием даже сегодня еще нельзя установить, что следует понимать под «обрабатываемостью». В своем сводном труде, опубликованном в недавнем прошлом, Резников [16] пишет следующее: «Обрабатываемость является сложным понятием, включающим комплекс свойств и показателей, характер образования стружки, силу, температуру, износ, стойкость и скорость резания, качество обработанной поверхности и поверхностного слоя».

Еще интереснее, что отчет комитета ЦИРП, упомянутый во введении настоящей работы, начинается так: «На основании дотеперешних результатов исследований нельзя определить понятие «обрабатываемость», так как оно является «флогистоном» современности. Невозможно точно знать, каким образом действует обрабатываемость».

Независимо от этого, неоспоримым фактом является то, что исследователями вместо поисков точного определения разработаны методы измерения,

которые принесли пользу промышленности, выпускающей заготовки, и машиностроительным заводам, перерабатывающим их. Эти методы можно разбить на три больших группы на основании основных свойств, характеризующих обработку резанием. В таблице № I дается обзор главных свойств.

Таблица I

Обрабатываемость металлов  
(Разработана комиссией ЦИРП (см. [4])

Характерное основное свойство	Характеристики других свойств	Факторы, непосредственно влияющие на обрабатываемость	Факторы, косвенно влияющие на обрабатываемость
Эффективность снятия стружки	Потребляемая мощность, образование стр.	Механизм резания (образование стружки)	1. <i>Материал заготовки и инструмента.</i> Микроструктура, механические, физические, химические свойства, термообработка
Стойкость инструмента	Лункообразный износ, износ спинки реза		
Качество заготовки и свойства её поверхностных слоёв	Шероховатость поверхности, точность размеров, степень поверхностного разрушения	Режущее усилие Температура резания	2. <i>Условия резания</i> Скорость резания, охлажд.-смазывающая жидкость, способ охлаждения (поток жидкости, место потока), поточное и прерывистое резание (колебание) 3. <i>Станок</i> Тип, величина, мощность, конструкция, жёсткость 4. <i>Инструмент</i> Геометрия реза, форма, расположение

Из таблицы № I видно, что обрабатываемость является функцией многих факторов, действие которых друг другу часто противоположно. Из этого можно понять провал каждой попытки, характеризовавшей обрабатываемость исключительно одной численной величиной. Достаточно сослаться хотя бы на «механибилити индекс» Мерчанта как на самый известный [17].

Далее, достойно внимания, что, в то время как западноевропейские исследователи считали своей целью создание самых различных индексов, советские исследователи стремились точно определить важнейшую характеристику обрабатываемости, зависимость  $V - T$  (уравнение Тейлора) уже в начале пятидесятых годов.

В самом общем виде эта зависимость может быть записана:

$$vT^m = C \dots, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость резания в м/мин,  
 $T$  — стойкость режущего инструмента в мин,  
 $m$  и  $C$  — постоянные, определяемые экспериментально ( $m < 1$  и  
называемой также постоянной Тейлора).

На десять лет позже в Америке тоже это считалось самым полезным решением для производственной практики, несмотря на то что классическое определение связано с большими расходами.

Ускоренные, значит более экономичные методы определения зависимости  $v = f(T)$  с самыми лучшими результатами начали развивать Даниелян [6], Панкина [18] и другие. Их деятельность была решающей в Венгрии. Так, например, профессор д-р А. Кардош развил дальше метод термопары резец — изделие и распространил также на исследование обрабатываемости легких металлов [14].

Точный анализ сложных процессов — за неимением соответствующей математической модели — на сегодняшнем уровне исследовательских работ представляется невыполнимым. Поэтому наблюдения еще имеют большое значение. Автор настоящей работы по случаю одной продолжительной исследовательской работы, следуя рекомендации советских исследователей, тоже вымерил, что зависимость  $v - T$ , определенная классически, в случае тщательного ускоренного метода измерения температуры, дает зависимость, находящуюся в хорошей корреляции с предыдущей [15].

Если два определения, производимые на основании двух различных принципов — на принципе измерения износа и термического измерения — согласованы настолько, то причину этого следует искать в том, что при обработке резанием — предполагая все прочие условия равными — стойкость режущего инструмента определяется в первую очередь температурой, доминирующей в зоне резания, имеющей сложную регулируемую роль в отношении износа кромки резца. Иначе говоря, если при экспериментальном изменении величины скорости  $v$ , глубины резания  $t$  и подачи  $s$  получается уравнение температуры  $\Theta = f(v, t, s)$  или уравнение износа  $\Delta = f(v, t, s)$ , то полученные уравнения представляют собой различные математические зависимости тождественных физических причин. Решая эти уравнения на  $v$ , можно прийти до зависимости  $v - T$ , характеризующей лучше обрабатываемость (при резании эталонного образца — режущую способность), чем единственный показатель. Вопросом остается, можно ли выполнить эту операцию уравнениями, полученными эмпирически, независимо от размерностей. На этот вопрос дает положительный ответ одновременная деятельность нескольких исследователей.

В Советском Союзе Силин [19] применением теории подобия, а в США Кроненберг [20] размерным анализом доказали на случай тождественного спаривания заготовка — инструмент и геометрии кромок, что главные параметры  $v, t, s$ , характеризующие резание, находятся в математической зависи-

мости с дробным показателем от стойкости  $T$  инструмента. Для более легкого обозрения рассмотрим их двух приемов важнейшие шаги размерного анализа.

## 2. Толкование зависимости $v - T$ методом размерного анализа

Эксперименты, проводимые по обработке резанием, начиная с первых исследований Тейлора, доказали об уравнении  $vT^m = C$ , что постоянные  $m$  и  $C$  в зависимости от обрабатываемой детали и от материала инструмента изменяются в функции времени и скорости, определяющей тепловой эффект. Уравнение содержится в наших подручниках в так называемой уточненной форме для того, чтобы учесть действие сил, зависящее от поперечного сечения стружки  $t \cdot s$  в следующей форме:

$$v = \frac{C_v}{T^m s^{x_v} t^{y_v}}, \quad (2)$$

т. е., кроме вышеупомянутых переменных, в уравнении имеются дальнейшие два параметра обработки резанием, а именно подача  $s$  и глубина резания  $t$ . Вместе с новыми переменными в уравнении фигурируют два новых показателя  $x_v$  и  $y_v$ , характерные для данных условий. В этом виде уравнение  $v - T$  подходит и для технологического проектирования и его значение все возрастает с введением планирования процессов с помощью вычислительной техники. Опыт подтверждает, что показатели  $m$ ,  $x_v$ ,  $y_v$  всегда фигурируют в виде дробных показателей в случае, если эксперименты оцениваются графоаналитическим методом. Эти наблюдения послужили основой для того, чтобы Кроненберг, исходя из фактических характеристик сделал попытку вывести уравнения с дробными показателями путем размерного анализа. Его контекст состоит в следующем:

Предположим, что на стойкость режущего инструмента оказывают влияние теплопроводность материала инструмента и обрабатываемой детали, благодаря чему тепло отводится из зоны резания. Величина же количества тепла, возникающего за единицу времени, зависит от того, какое режущее усилие требуется развить для снятия стружки единичного поперечного сечения при данной скорости. Исходя из этого предположим, что на температуру доминирующей зоны соприкосновения оказывают влияние физические характеристики, представленные в таблице II.

С помощью физических основных единиц — температуры  $v$ , времени  $T$ , длины  $L$  и массы  $M$ , применяя обозначения таблицы II размерного анализа приведет к температурным уравнениям

$$\tau = \frac{C_{\theta} F A^n}{H^{0,5}} v^{(1-2n)} T^{(0,5-2n)}, \quad (3)$$

Таблица II

Физические характеристики, используемые для размерного анализа

Физическая величина	Размерность	Обозначения
Температура инструмента	$\theta$	$\tau$
Стойкость реза	$T$	$T$
Поперечное сечение стружки	$L^2$	$A$
Удельная режущая сила	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	$F$
Скорость резания	$L \cdot T^{-1}$	$v$
Величина, характеризующая тепло (плотность > теплоёмкость > теплопроводность)	$M^2 \cdot T^{-5} \cdot \theta^{-2}$	$H$

где  $C_0$  и  $n$  — постоянные, определяемые экспериментально. Перестановкой этого температурного уравнения по скорости получается:

$$vT^{\frac{(0,5-2n)}{1-2n}} = c_c. \quad (4)$$

Введя обозначение  $m = \frac{0,5 - 2n}{1,0 - 2n}$ , из выражения (4) дойдем до уравнения  $v - T$ . Кроненберг доказал также, что постоянная  $n$  может изменяться в пределах  $0 \div 0,250$ . Следовательно, при обработке резанием сталей и металлических материалов этот показатель  $m$  может составлять величины порядка от 0,5 до 0. Это согласуется с опытом.

Если из шести физических характеристик, например,  $A$  и  $F$  являются постоянными, но  $H$ , т. е. совокупная теплотворная способность инструмента изменяется, то изменяется и температура  $\tau$ , следовательно, и величины  $C_0$  и  $n$  температурного уравнения тоже изменяются. Значит, выведенное из него уравнение  $v - T$  и его постоянные вправе можно предполагать, что из-за изменяющейся температуры износ реза будет тоже другим.

Значит, уравнение  $v - T$  закрепляет в математической формуле процесс, происходящий от износа, представленного на фиг. 1. Инструмент, показанный на фиг. 1, в состоянии снимать стружку до того момента  $T$ , когда износ, происходящий одновременно на спинке и передней кромке реза, осла-

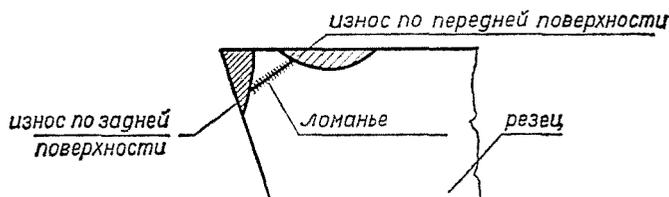


Рис. 1. Одновременное образование износов, находящихся под влиянием температуры резания как физические причины разрушения режущей кромки (принципиальная фигура)

бит его прочность до такой степени, что кромка выламливается и дальнейшая обработка резанием становится невозможной. *Значит, в уравнении (4) в неявной форме выражен износ, зависящий от физических характеристик.*

Таким образом, понятно, почему определялась зависимость  $v - T$  со времен ее открытия испытанием на износ. Сложившаяся практика продолжительных (классических) испытаний обработки резанием состоит в том, что наблюдается характерный размер либо износа спинки, либо лункообразного износа в функции времени. Этот метод оправдал себя, но для сокращенных измерений не годится, так как функция не интерполируема.

Определение температурных уравнений приводит также к уравнению  $v - T$ , как это показано Даниеляном [6]. Однако, чтобы получить его постоянные, приходится проводить дополнительные измерения износов. Эта двойственность была устранена автором путем применения нового метода измерения износа [15]. Автор предполагал, что измерением износа на физических основах, так называемым объемным измерением износа, можно снять интерполируемые функции износа. Ввиду того, что результаты размерного анализа дают право выражать величины скорости  $v$  из уравнения температуры или из функции износа, уравнение  $v - T$  может быть определено и сокращенным методом. Это основательное предположение оправдано и в Венгрии измерениями, выполняемыми уже несколько лет. Сущность этого приема излагается в следующей главе.

### 3. Определение физически толкуемых функций износа

Условия износа трущейся друг на друге пары металлов изучались подробно Костецким; удалось установить аналогию с явлениями, наблюдаемыми при обработке резанием [21]. Испытаниями, проводимыми на истирателе известного принципа работы, он показал, что если повышать скорость до нескольких метров в секунду, то скорость износа испытуемого стержня может быть разбита на участки, хорошо ограничиваемые. Изобразив износ в функции времени, можно отметить три зоны.

Первую зону в пределах скорости износа 0—1 мм/сек, вторую зону в пределах скорости износа 1—2 мм/сек и, наконец, зону со скоростью износа, превышающей 2 мм/сек, при которой кривая начинает расти экспоненциально. Наблюдая изношенные поверхности и дериваты износа, обнаружили, что в первой зоне, где из-за небольшой скорости температура невысока, вследствие трения Амонтона—Кулона, массу изношенных дериватов составляют скаленные вершины. Эта зона была названа Костецким зоной схватывания первого рода, или зоной абразивного износа. При скорости, превышающей величину  $v = 0,5$  мм/сек, износ уменьшается. Согласно исследованиям, причиной этого является то, что из-за повышения температуры повышается степень

окисления материалов, трущихся друг на друге, и возникающие твердые окислы изнашиваются меньше, чем основной металл. Износ окисления наступает при скорости 1 м/сек и поэтому вторая зона, где увеличение износа в функции скорости почти линейно, и возрастает в малой степени, была названа Костецким зоной износа окисления. При скорости, близкой 2 м/сек, образование тепла настолько интенсивно, что возможна и диффузия частиц металла. И тут наблюдается схватывание. Поэтому можно рассматривать как зону вторичного схватывания, или же как зону износа, вызванного теплом. Костецким подтверждено, что это наблюдение вполне аналогично явлению, наблюдаемому у резцов из твердых сплавов. При  $v < 60$  м/мин (т. е.  $< 1$  мм/сек) в этой зоне скорости они изнашиваются чрезвычайно быстро. В зоне скорости  $v > 120$  м/мин можно доказать их диффузионный износ, сопровождаемый сильным образованием лунок.

Значит, если обозначить через  $V$  объем материала, стертого с инструмента (резца), то можно написать качественную функцию износа:

$$V = V_A + V_B + V_D + V_E, \quad (5)$$

где  $V_A$  — абразивный износ,  
 $V_B$  — излом, износ вследствие усталости,  
 $V_D$  — диффузионный износ,  
 $V_E$  — до сего времени еще неизвестные другие виды износа.

Если  $T$  — время резания,  $v$  — скорость резания,  $t$  — глубина разания и  $s$  — подача, то согласно опыту экспериментов вообще при обработке резанием существует функция износа  $V = f(T, v, t, s)$ , точный вид которой еще в настоящее время неопределим. Если бы было заранее известно, после какого износа  $V_T$  наступит разрушение кромки резца, то, зная функцию износа при условии, что

$$\int_0^T \frac{dV}{dT} dT \leq V_T, \quad (6)$$

было бы возможно определить стойкость резца для данных величин  $v$ ,  $t$  и  $s$ . Над математическим решением этой точной функции работают и в наши дни очень многие исследователи. Однако существуют практические решения, которые позволяют определить стойкость резца  $T$  тем, что функцию определяют экспериментально.

Классическое решение основано на одномерном измерении износа, т. е. на измерении износа спинки резца. Согласно фиг. 2/а в определенных промежутках времени измеряется, например, размер  $VB$ . В результате этого согласно фиг. 2/а, измеряется кривая продолжительности износа.

Момент времени, при котором кривая начинает резко подниматься, принимается за стойкость резца. Измерение требует большого опыта, но недостаточно точно и чрезвычайно трудоемко. Смотря на то, что на спинке кромки изнашивается объем, но измеряется только один параметр, характер полученных кривых, хотя является тождественным, кривые поднимаются по-разному, только конечный, резко повышающийся участок может быть определен с некоторым рассеянием в случае повторных измерений. По этой причине нельзя заключать экстраполяцией о стойкости резца на основе кратковременных экспериментов. Значит, так называемый сокращенный прием таким способом не может быть создан. Упомянутое предложение ИСО [5] категорически запрещает экстраполяцию. Запущенные в производство новые

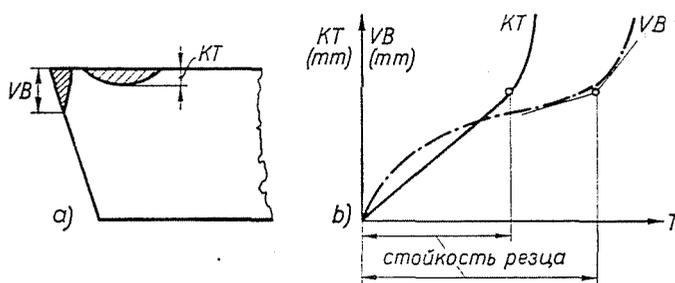


Рис. 2. Классический способ определения стойкости резца (приём, названный автором однопараметровым): а)  $VB$  на спинке,  $KT$  — на фаске «один» из измеренных параметров износа; б)  $VB = f(T)$  или  $KT = f(T)$  — кривые как функции времени износа. Кривые, полученные таким образом, не могут быть интерполированы

стали, обрабатываемые резанием с применением раскислителя, при обработке с помощью кромок из твердого сплава обеспечивают высокую стойкость по сравнению с обычными дотеперешними конструкционными сталями, и именно поэтому они могут быть квалифицированы только надежным сокращенным методом. Это возможно при так называемом двухпараметровом измерении износа.

В Венгрии начали впервые измерять износы путем одцовременного измерения двумя параметрами [15]. Сущность этого приема показано на фиг. 3. Его принцип состоит в следующем.

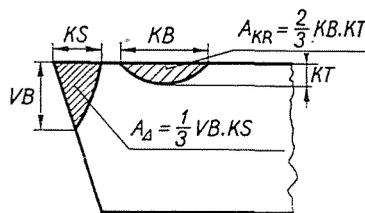


Рис. 3. Двухпараметровое измерение, предложенное автором. С помощью двух параметров, измеряемых одновременно, можно вычислить площадь сечения износа ( $A_{kr}$  на спинке или  $A_A$  на фаске)

Как на спинке, так и на торце резца в сечении, перпендикулярном кромке, изнашивается собственно круговой сегмент, что может быть подтверждено многочисленными измерениями. Если эту площадь отнести к единице длины кромки, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} V_A &= f(KS, VB) = A_d \cdot l, \\ V_{kr} &= f(KB, KT) = A_{kr} \cdot l, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $A_d \cong 1/2 (KS \cdot VB)$  и  $A_{kr} = 2/3 (KB, KT)$ .

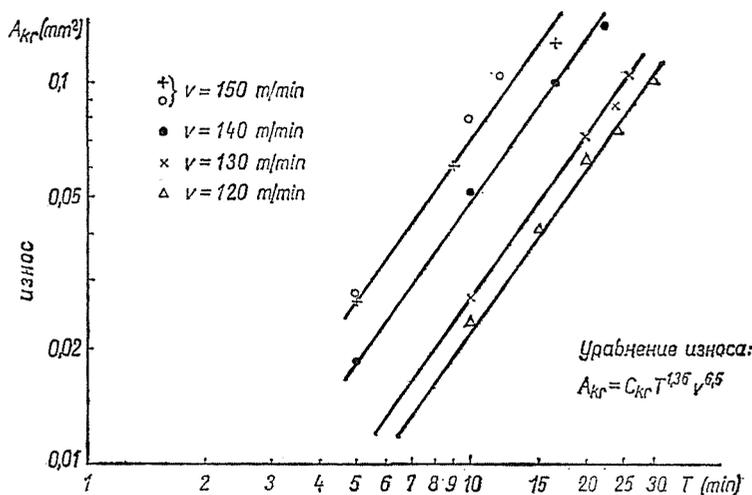


Рис. 4. Изменение лункообразных сечений в функции времени при точении резцами из твердых сплавов на случай различных скоростей резания

Изменение этих величин сечений в функции времени является характерным для количеств, стирающихся из объема, и, ввиду того, что при расчетах всегда учитывается геометрическое положение, могут быть получены интерполируемые и экстраполируемые функции износа.

Значит, прием удобен для сокращенных процессов. На фигуре 4 показана диаграмма, снятая при резании рабочим концом инструмента из твердого сплава методом лункерного измерения износа. Фигура показывает больше кривых при возрастающих скоростях, у которых остальные характеристики резания являлись постоянными величинами. Подобные кривые могут быть сняты, если сохраняется постоянная величина скорости, и изменяются только подача ( $s$ ) или же величины глубины резания ( $f$ ). Кривые, полученные таким образом, позволяют определение функции износа графоаналитическим путем. Функция износа, показанная в качестве примера на фиг. 4, получается такой:

$$A_{kr} = C_{kr} T^{1,36} v^{6,5}. \quad (8)$$

Подобные кривые износа могут быть построены также измерением износа спинки резцов, но они менее точны, ибо размеры признаков износа меньше. Из числа советских исследователей Даниелян был первым, который сделал попытку составить уравнения стойкости резцов на основании функций износа, определенных однопараметровым методом. Однако полученные им результаты не согласовывались с действительностью, потому что однопараметровое измерение износа зависит от геометрических условий и поэтому дает большое рассеяние.

#### 4. Пример для применения предложенного метода

Применение метода определения функции износа, предложенного автором в предыдущей главе, в Венгрии широко распространено — [22 — 24]. Значит, если в качестве практически внешней характеристики принять зависимость  $v - T$ , которая в случае эталонной заготовки содержит также самые существенные информации насчет режущей способности инструмента, то предлагаемый метод с точки зрения точности и экономичности обозначает шаг вперед по сравнению с дотеперешними. Хотя метод требует много расчетов, но отличается низким расходом материалов, который по сравнению с классическими испытаниями сокращается примерно в десять раз. По своей высокой точности он особенно пригоден к относительным испытаниям. Это свойство можно успешно использовать особенно при испытаниях эффективности охлаждающих-смазывающих жидкостей [24]. Для наглядного представления вышеизложенных приведем серию измерений.

##### 4.1. Цель и условия испытания

Определить зависимость  $v - T$  для стали марки  $C_T 45$ , обрабатываемой резанием резцом из быстрорежущей стали типа 18-4-1, если глубина резания  $t = 2,5$  мм, подача  $s = 0,4$  мм/об, охлаждение осуществляется с применением 5% эмульсии. Геометрия резца в соответствии с рекомендацией ИСО/ТС 29 (см. таблицу III).

Таблица III

Данные измерения для определения уравнения износа

Метод определения: измерение сечения лунки	Условия резания:
Материал заготовки: С-45 (НВ 200)	Глубина резания $t = 2,5$ мм
Материал инструмента: быстрорежущая сталь (18-4-1)	Подача $s = 0,4$ мм/об
Способ охлаждения: 5% эмульсия, 3,5 л/мин	Скорость: переменная
Способ вычисления сечения износа: таблица кругового сектора	Геометрия резца: $\alpha = 6^\circ$ , $\gamma = 14^\circ$ , $k = 75^\circ$

№	v, м/мин.	T, мин	Размеры сечения		КТ		A <sub>1</sub> (мм <sup>2</sup> )	(KB) <sup>2</sup>	Ak <sub>2</sub> (мм <sup>2</sup> )	Примечание
			KB	КТ	К В	К В				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	30	1,97	2,74	0,033	0,0120	0,0080	7,51	0,061		
2		3,96	2,78	0,050	0,0280	0,0120	7,73	0,093		
3		7,90	2,90	0,070	0,0240	0,0165	8,41	0,140		
4		12,30	2,92	0,091	0,0210	0,0210	8,52	0,178		
5	32	1,97	2,75	0,036	0,0130	0,0091	7,56	0,070		
6		3,96	2,86	0,055	0,0195	0,0130	8,18	0,106		
7		7,90	2,90	0,083	0,0285	0,0190	8,41	0,160		
8		12,30	2,92	0,105	0,0360	0,0240	8,52	0,205	Повторено из-за	
9	33	1,97	2,78	0,047	0,0170	0,0112	7,73	0,087		
10		3,96	2,80	0,070	0,0230	0,0166	7,84	0,132		
11		7,90	2,83	0,105	0,0370	0,0250	8,00	0,200		
12		12,30	2,89	0,139	0,0480	0,0326	8,35	0,272		
13	38	1,97	2,83	0,074	0,0265	0,0186	8,00	0,150		
14		3,96	2,86	0,115	0,0400	0,0267	8,18	0,220		
15		6,00	2,88	0,142	0,0490	0,0328	8,30	0,272		
16		10,00	2,90	0,186	0,0640	0,0420	8,41	0,350	Сгорание возможно	

Примечание: В столбцах 2 — 5 имеются данные измерений, в столбце 6 — расчётные величины. В столбце 7 — интерполированные величины таблицы кругового сегмента из труда Бронштейн-Семендяев: Подручник математики. В столбце 8 квадраты величин столбца 4. В столбце 9 находятся произведения величин столбцов 8 и 7 как площадь измеренных сечений. Величины нанесены на диаграмме рис 5.

Испытания проводились на токарном станке венгерского производства типа Е-500 с переменным числом оборотов. Исходный диаметр заготовки составлял 180 мм. Согласно предписанию, термическая обработка выполнена для величины НВ = 200. Рассеяние величины твердости соответствовало пределу допусков по предписаниям ИСО/ТС 29.

#### 4.2. Определение функции износа

На основании предварительных экспериментов испытание следует выполнять при следующих четырех величинах скорости:

$$\begin{aligned}v_1 &= 30 \text{ м/мин,} \\v_2 &= 32 \text{ м/мин,} \\v_3 &= 33 \text{ м/мин,} \\v_4 &= 38 \text{ м/мин.}\end{aligned}$$

Подбор максимальной скорости обоснован тем фактом, констатированным во время предварительных экспериментов, что при этой скорости ожидаемая стойкость резца составляет примерно  $t \approx 10$  минут. На других скоростях продолжительность измерений износа составляла  $t < 15$  минут.

Результаты измерений в пересчете по принципу, описанному в п. 4, дают величины сечения лункером, представленные в таблице III.

Величины вычисленных сечений лункеров представлены на фиг. 5, в виде диаграммы лог-лог. Графоанализом получаются величины для показателя времени  $n = 0,58$ , для показателя скорости  $p = 4$ . С помощью этих величин для функции износа имеем

$$A_{kr} = C_{kr} t^{0,58} \cdot v^4 \tag{9}$$

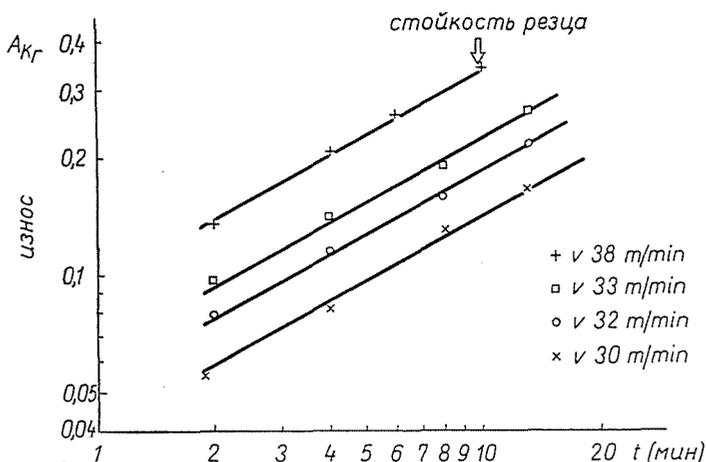


Рис. 5. Кривые  $A_{kr} = f(T)$ , вычисленные из данных износа, представленных в таблице III при четырёх различных скоростях резания из быстрорежущей стали (режим резания см. в таблице III)

Постоянная функция износа (9)  $C_{kr}$  определяется на основе следующих сопряженных точек с учетом нижеприведенных данных кривой, определенных при скорости  $v = 38$  м/мин на фиг. 5, при которых получается конец стойкости резца:

$$\begin{aligned} v &= 38 \text{ м/мин,} \\ t &= 10 \text{ мин,} \\ A_{kr} &= 0,350 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Из функции износа, применяя предыдущие величины, получаем

$$C_{kr} = \frac{0,350}{10^{0,58} \cdot 38^4} = 4,415 \cdot 10^{-8}, \tag{10}$$

то есть для случая выбранного режима резания ( $t \cdot s = 2,5 \cdot 0,4 \text{ мм}^2$ ) функция износа получается в конечном виде

$$A_{kr} = 4,415 \cdot 10^{-8} \cdot T^{0,58} \cdot v^4. \tag{11}$$

#### 4.3. Вычисление зависимости $v - T$ из функции износа

Решая уравнение износа (11) на  $v$ , можно написать

$$v = \left[ \frac{A_{kr}}{4,415 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{4}} \frac{1}{T \frac{0,58}{4}},$$

Уравнение (12) дает величину  $C_v$  зависимости  $v - T$  в том случае, если подставить за величину сечения лункера, принадлежащую точке стойкости резца в квадратных скобках:

$$C_v = \left[ \frac{0,350}{4,415 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{4}} = 53,3.$$

Учитывая, что  $0,58 : 4 = 0,14$ , зависимость  $v - T$  в конечном виде

$$v = \frac{53,3}{T^{0,14}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) подстановкой скорости резания, принадлежащей  $T = 60$  минут (тоже для случая точения, характеризуемого данным снятием стружки  $t \cdot s = 2,5 \cdot 0,4$  мм<sup>2</sup>), можно получить

$$v = \frac{53,3}{60^{0,14}} \cong 30 \text{ м/мин}.$$

Для информации нормативы, применяемые на заводах Венгрии [25] на случай тождественных заготовок, материалов и инструмента из быстрорежущей стали при глубине резания  $t = 2,5$  мм, при подаче  $s = 0,4$  мм, стойкости, равной  $T = 60$  мин, допускают скорость резания, равную  $v = 28,5$  м/мин, то есть, с помощью метода, предлагаемого автором, уравнение стойкости резца, вычисленное из уравнения износа, позволяет тоже сопоставление с имеющимися данными.

Упомянутое сопоставление показывает, что при охлаждении принятой 5%ой эмульсией обрабатываемость стали марки Ст 45 с точки зрения зависимости  $v - T$  выгоднее.

### 5. Оценка применения нового метода

Новый метод испытания по сравнению с классическим методом, основанным на исследовании только одного размера износа, обладает большими преимуществами. Его сущность заключается в том, что в ходе однопарамет-

рального измерения износа нельзя исключить геометрическую погрешность, происходящую оттого, что диаметр заготовки при испытаниях неизбежно изменяется. Это было подробно рассмотрено и доказано автором [26]. Новый метод одинаково подходит для исследования как спинки, так и торца резца. При исследовании лункообразного износа дает погрешность меньшую, чем другие методы.

Для статистической оценки погрешностей кафедрой технологии машиностроения Будапештского технического университета произведена большая серия испытаний путем обработки резанием около 2 тонн стали типа С-55 [22]. В рамках испытаний при резании резцами из твердого сплава, соответствующими ИСО/Р 20, были испытаны:

- а) сокращенный метод, основанный на измерении сечения лунки  $A_{kr}$ ;
- б) величина расхождений между отдельными измерениями, проведенными на 120 резцах с избранными величинами  $v$ ,  $t$ ,  $s$ .

С помощью измерений сечений  $A_{kr}$ , выполненных при сокращенной продолжительности до  $T = 10$  минут, получено следующее уравнение износа:

$$A_{kr} = 3,13 \cdot 10^{-14} \cdot T^{1,28} \cdot v^{5,7} \cdot s^{2,8} \cdot t^{0,78}.$$

Из этого зависимость  $v - T$ , вычисленную способом, соответствующим показанному выше примеру, можно представить следующим образом:

$$v = \frac{204}{T^{0,2} \cdot 0,49 \cdot 0,13}.$$

Из полученной таким образом зависимости при  $t = 3$  мм,  $s = 0,4$  мм/об и скорости  $v = 140$  м/мин установлена следующая величина стойкости резца  $T$ :

$$T = \left[ \frac{204}{140} \right]^{4,45} \cdot \frac{1}{3^{0,58} \cdot 0,4^{2,18}} = 22 \text{ мин.}$$

Затем с помощью выбранных 40 фасок была выполнена следующая программа:

после $T = 5$ минут	на 40 фасках,
после $T = 10$ минут	на 30 фасках,
после $T = 15$ минут	на 10 фасках,
после $T = 18$ минут	на 10 фасках,
после $T = 20$ минут	на 10 фасках,
после $T = 22$ минут	на 10 фасках

была определена площадь лункообразного сечения  $A_{kr}$ .

Согласно упомянутому предложению ИСО [5], нами проведена проверка надежности студента. На ее основе, в случае, если средняя величина, полученная при тех же условиях испытания

$$\bar{A}_{kr} = \frac{\sum_1^n A_{kr}}{n},$$

то рассеяние

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (A_{kr} - \bar{A}_{kr})^2}{n}},$$

и для 90%ой конфиденции можно взять из таблицы надежности студента величину  $a$ , с помощью которой можно вычислить рассеяние средних величин, то есть

$$A_{kr} = \bar{A}_{kr} \pm a\sigma.$$

В столбцах 7 и 8 таблицы IV показаны пределы конфиденции в 90%. Если рассмотреть величины, указанные к столбце 3 таблицы, то видно, что они все находятся между величинами, указанными в столбцах 7 и 8. Значит, метод является достаточно точным независимо от того, что является сокращенным.

Таблица IV

Статистическая точность нового метода испытания  
(На основе испытаний Кафедры технологии машиностроения  
Будапештского технического университета)

мин	Число измерений $n$	$A_{kr}$ (мм <sup>2</sup> )	$\sigma$	$a$	$a\sigma$	8	$A_{kr}$
			(при числе $n$ измерений)			предел	
1	2	3	4	5	6	7	8
5	40	0,0716	0,010	0,269	0,0028	0,0686	0,0742
10	30	0,2040	0,019	0,314	0,0061	0,1979	0,2101
15	20	0,3830	0,022	0,397	0,0091	0,3740	0,3920
18	10	0,5070	0,024	0,611	0,0149	0,4920	0,5220
20	10	0,5870	0,023	0,611	0,0144	0,5730	0,6010
22	10	0,6790	0,017	0,611	0,0106	0,6680	0,6890

### Резюме

Обработка резанием после своего столетнего прошлого, имеющего следы в специальной литературе, дошла до того этапа, когда из феноменологии она становится наукой. Блестящие предчувствия пионеров в промежуточных этапах часто попадали в тупик вследствие недостаточных заключений, извлекаемых из чрезвычайно комплексных зависимостей явлений.

Однако для производства накопился целый ряд хорошо используемых практических решений, а для науки — большое количество данных; особенно в области определения обрабатываемости и режущей способности исследования приблизились до физической сущности. Обработка множества данных измерений сегодня уже требует международного сотрудничества. Польза этого в недалеком прошлом стала хорошо измеримой в области взаимного использования данных испытаний, их критической оценкой также в развитии исследований обработки резанием в Венгрии, которые получили положительный толчок, ставший после 1945 г. доступным путем использования советских результатов. Одним из скромных результатов взаимного воздействия является и новый метод исследования, изложенный в настоящей статье, который, хотя оставляет много вопросов открытыми, но с помощью более точных и недорогих испытаний представляет собой дальнейший шаг на пути раскрытия действительности.

### Литература

1. Тиме, И. А.: Сопrotивление металлов и дерева резанию, Горный журнал, 1870.
2. Зворыкин, К. А.: Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек, Москва, 1893.
3. ТАУЛОР, F. W.: On the art of cutting metals, Trans. of ASME, vol. 28, No. 119, p. 31—350, 1907.
4. МИСНЕЛЕТТИ, G. F.: Work on machinability in the cooperative Group C of CIRP and outside this group. Annals of CIRP, vol. 18 (1970) No. 1, p. 13—19.
5. ISO/TC-29. Third draft proposal for an ISO recommendation: Tool life cutting tests with single point tools. Haag, 1970.
6. Даниелян, А. М.: Резание металлов и инструмент. Машгиз, Москва, 1950.
7. Исаев, А. И.: Процесс образования поверхностного слоя при резании металлов. Труды ЦНИИТМАШ, кн. 33, Машгиз, 1950.
8. Лоладзе, Т. Н.: Стружкообразование при резании металлов, Машгиз, 1952.
9. Рейтэ, Ш.: Воздействие внешних сил на механические свойства твёрдых тел (Основные принципы теоретической механики, том II.), Будапешт, 1919 (венг. изд.).
10. ТАУЛОР, F. W.—WALLICHNS, A.: Über Dreharbeit und Werkzeugstahle, Berlin, 1917.
11. Казинци, Л.: Исследование деформаций, возникающих в корне стружки в процессе обработки резанием стали. Докторская диссертация, Будапешт, 1939 (на венг. языке).
12. Хорнунг, А.: Теория обработки резанием и инструменты обработки резанием. Издательство учебников, Будапешт, 1953 (на венг. языке).
13. Баконди, К.: Определение обрабатываемости металлов. Канд. диссертация, АНВ, рукопись, Будапешт, 1956 (на венг. языке).
14. Каласи, И.: Исследование явлений износа при обработке металлов резанием. Канд. диссертация, АНВ, рукопись, Будапешт, 1964 (на венг. языке).
15. Кардош, А.: Исследование обрабатываемости сплавов алюминия. Канд. диссертация, АНВ, рукопись, Будапешт, 1956 (на венг. языке).
16. Резников, Н. И.: Методы оценки обрабатываемости металлов резанием, основанные на исследовании их физико-механических свойств и параметров процесса резания. Высокопроизводительное резание в машиностроении. Сб. статей под ред. А. И. Исаева «Наука», М., 1966.
17. MERCHANT, M. E.: Mechanics of metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. Jour. of Applied Physics, vol. 16, No. 6, p. 267—275. June 1945.
18. Панкина, Е. А.: Температурные исследования при резании металлов. Диссертация, 1943.
19. Силин, С. С.: Расчёты обрабатываемости металлов на основе изучения процессов стружкообразования методом теории подобия. Сб. статей под ред. Исаева «Наука», Москва, 1966.
20. KRONENBERG, M.: Ultra high speed and other metal cutting phenomena explored by dimensional analysis. ASTM paper No 331, Michigan, 1961.
21. Костецкий, В. И.: Сопrotивление изнашиванию деталей машин. Машгиз, Москва, 1959.
22. Немет, И.: Статистическая оценка стойкости резцов, определённая лункообразным износом. Дипломная работа. Каф. техн. машиностроения БПУ, Будапешт, 1967 (на венг. языке).

23. Тот, Т.—Вадас, Д.: Определение оптимального числа заточки резца в случае лункообразного изнашивания. Конференция по инструментам обработки металлов, Мишкольц, 1969 (на венг. языке).
24. KALÁSZI, I.: Evaluation of cutting fluids by a new crater wear measuring method. *Periodica Polytechnica*, vol. 13 (1969) No. 3, p. 293—302.
25. Основные нормы МТП: Точение однолезвийными инструментами, Будапешт, 1950 (на венг. языке).
26. KALÁSZI, I.: A corrected method for determination of flank wear on the single point cutting tool when turning steel. *Acta Technica*, Tomus LII, 1956. Budapest.

Проф. д-р Иштван Каласи Н-1521 Будапешт