

УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ КАЧЕСТВ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ

РОЗЕНБЕРГ А. М.

Профессор, доктор технических наук

Предложенные до сего времени различные экспресс-методы определения режущих качеств инструментов и обрабатываемости металлов или полностью себя не оправдали, или имеют ряд недостатков и ограниченные пределы применения. Из известных в настоящее время ускоренных методов заслуживающими внимания является метод Рейхеля и метод Ван-Донгена (торцевой обточке). Первый из них до сего времени недостаточно проверен и возможность применения его окончательно не установлена. Метод Ван-Донгена достаточно надежно проверен работами лаборатории резания металлов Горьковского автозавода им. Молотова, но имеет узкие пределы применения. Этот метод применим для испытания только резцов и п. и том резцов только из быстрорежущей стали. Для этого инструмента он до сего времени только и применялся. Можно думать, что он неприменим в тех случаях, когда резец тупится постепенным износом задней грани и за критерий затупления принимают определенную ширину фаски износа задней грани. Такое затупление наблюдается при работе резцов с пластинками из твердых сплавов, и для испытания их указанный метод не применим. Само собой разумеется, что он неприменим также по самой своей сущности для испытания всех иных инструментов, кроме резцов.

До сего времени наиболее широким распространением, как при определении режущих качеств различных типов инструментов, так и при определении обрабатываемости различных металлов пользуется метод „фаутэ“ (VT), причем в последнее время в тех случаях, когда инструмент затупляется по задней грани, этот метод дополняется наблюдением за износом задней грани. Метод „фаутэ“, являющийся совершенно надежным, обладает тем недостатком, что требует значительных затрат времени, металла и инструмента, особенно, если испытания проводятся по металлу с неизвестной, хотя бы приблизительно, обрабатываемостью или инструментом с неизвестными режущими качествами.

Режущие качества инструмента, а также и обрабатываемость металла характеризуется уравнением

$$v = \frac{K}{T^m} \quad (1)$$

где v — скорость резания в м/мин.,

T — стойкость в минутах,

K — постоянная, зависящая от режущих качеств инструмента и обрабатываемости металла,

m — величина, зависящая в основном от характера износа инструмента.

Показатель степени $\frac{1}{m}$ тем меньше, чем больше преобладает тепловой износ инструмента над механическим. Таблица 1 показывает, что величина показателя относительной стойкости $\frac{1}{m}$ изменяется для различных инструментов в широких пределах.

Таблица 1

Режущий инструмент	$\frac{1}{m}$	Источник
Резцы быстрорежущие	0,08—0,13	НКТМ. Типовые нормы износа и стойкости режущего инструмента, 1941 г.
Резцы с пластинками из твердого сплава	0,16—0,2	
Резцы быстрорежущие	0,05—0,143	Аваков. Зависимость скорость—стойкость. Проф Рудник, Конференция по резанию металлов. АН СССР, 1937 г.
Резцы с пластинками из твердого сплава.	0,1—0,33	
Сверла быстрорежущие	0,13—0,2	НКТМ. Типовые нормы износа и стойкости режущего инструмента. Машгиз, 1941 г.
Сверла, оснащенные твердым сплавом	0,4	
Зенкера быстрорежущие	0,11—0,3	
Зенкера, оснащенные твердым сплавом	0,4	
Плашки	0,3—0,6	
Фрезы цилиндрические	0,3	
„ концевые	0,2—0,46	
„ торцовые	0,13—0,2	
„ червячные модульн.	0,23—0,47	
Протяжки шлицевые и круглые	0,6	
Метчики	0,6—0,9	Справочник по режимам резания при нарезании резьбы. Наркомтанкопром, Машгиз, 1942 г. Справочник по режимам резания при нарезании резьбы. Наркомтанкопром. Машгиз, 1942 г.
Резьбовые фрезы	0,6—1,1	

Таким образом, показатель относительной стойкости для различных инструментов изменяется в широких пределах: от 0,05 до 1,1.

Чем меньше величина $\frac{1}{m}$, т. е. чем больше m , тем более узкие пределы скоростей резания соответствует применяемым в производстве или принимаемым при экспериментах пределам изменения стойкости.

Так например, при $m=15$, т. е. при $\frac{1}{m}=0,066$ изменение скорости резания на 10%—изменяет стойкость в 4,2 раза, изменение же скорости на 20%—изменяет стойкость в 15,5 раза. Поэтому, если представить себе, что проводятся стойкостные испытания такого инструмента и при этом желательно получить стойкости от 4 до 60 минут, т. е. изменяющиеся в 15 раз, все опыты должны быть проведены при скоростях, изменяющихся в пределах лишь 20%. Если при этом режущие качества инструмента или обрабатываемость металла заранее неизвестны, то очень трудно нащупать ту область скоростей, которая будет соответствовать желаемым габаритам стойкости, и незначительные отклонения из этой области скоростей вверх будут давать мгновенное затупление инструмента, незначительные отклонения вниз будут делать опыты очень длительными

и требующими значительной затраты металла. Таким образом, экспериментатору требуется провести целый ряд пробных опытов, которые привели бы его в ту область скоростей, которая соответствует желательным габаритам стойкости, и нередко на эти пробные опыты затрачивается больше времени, металла и инструмента, чем на основные.

В дальнейшем изложении мы даем описание метода переменной скорости, который дает возможность при помощи лишь одного пробного опыта определить ту область скоростей, в которой должны проводиться эксперименты, а при необходимости приблизительно определить режущие качества инструмента или обрабатываемость металла позволяет ограничиться всего лишь двумя опытами, включая и пробный. Этот метод в отличие от метода Ван-Донгена является методом не непрерывно, а ступенчато изменяющейся скорости резания и применим к любому из режущих инструментов, с обязательным условием наличия такого станка, на котором скорость можно было бы менять достаточно мелкими ступенями.

Метод ступенчато-меняющейся скорости резания

Заставим работать испытуемый инструмент в течение τ минут на скорости V_1 , затем τ минут на скорости V_2 , затем τ минут на скорости V_3 и так далее, увеличивая скорость до тех пор, пока на скорости V_n , проработав θ минут, инструмент не затупится. При этом $\theta < \tau$. Скорости V_1, V_2, V_3 и т. д. пусть возрастают по некоторой геометрической прогрессии с знаменателем C , то-есть:

$$V_2 = CV_1; \quad V_3 = CV_2 = C^2V_1; \quad V_4 = CV_3 = C^3V_1; \dots V_n = C^{n-1}V_1.$$

На первой ступени скорости V_1 инструмент проработал бы до затупления T_1 минут

$$T_1 = \frac{K^m}{V_1^m}.$$

После того как инструмент проработал на первой ступени скорости время τ и $\tau < T_1$, у него имеется неиспользованный остаток стойкости $T_1 - \tau$. На скорости $V_2 = CV_1$ этот остаток стойкости дал бы инструменту стойкость

$$(T_1 - \tau) \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m = \frac{T_1 - \tau}{C^m}.$$

После того как на скорости V_2 инструмент проработал τ минут, он обладает остатком стойкости

$$\frac{T_1 - \tau}{C^m} - \tau,$$

который на скорости V_3 дал бы стойкость

$$\left(\frac{T_1 - \tau}{C^m} - \tau\right) \cdot \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^m = \frac{T_1 - \tau}{C^{2m}} - \frac{\tau}{C^m}.$$

После работы τ минут на скорости V_3 инструмент обладает остатком стойкости

$$\frac{T_1 - \tau}{C^{2m}} - \frac{\tau}{C^m} - \tau,$$

который на скорости V_4 дал бы инструменту стойкость

$$\left(\frac{T_1 - \tau}{C^{2m}} - \frac{\tau}{C^m} - \tau\right) \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^m = \frac{T_1 - \tau}{C^{3m}} - \frac{\tau}{C^{2m}} - \frac{\tau}{C^m}.$$

На скорости V_n , при которой происходит затупление, остаток стойкости инструмента Θ , для которого можно написать равенство

$$\Theta = \frac{T_1 - \tau}{C^{(n-1)m}} - \frac{\tau}{C^{(n-2)m}} - \frac{\tau}{C^{(n-3)m}} - \dots - \frac{\tau}{C^{2m}} - \frac{\tau}{C^m}.$$

Это уравнение можно переписать в следующем виде:

$$\Theta = \frac{T_1}{C^{(n-1)m}} - \tau \left[\frac{1}{C^{(n-1)m}} + \frac{1}{C^{(n-2)m}} + \frac{1}{C^{(n-3)m}} + \dots + \frac{1}{C^{2m}} + \frac{1}{C^m} \right].$$

Здесь

$$\frac{T_1}{C^{(n-1)m}} = \frac{K^m}{V_1^m \cdot C^{(n-1)m}} = \frac{K^m}{V_n^m}.$$

Поэтому

$$\Theta = \frac{K^m}{V_n^m} - \tau \left[\frac{1}{C^{(n-1)m}} + \frac{1}{C^{(n-2)m}} + \frac{1}{C^{(n-3)m}} + \dots + \frac{1}{C^m} \right].$$

При $C > 1$ и $n > 1$ в квадратных скобках возрастающая геометрическая прогрессия с знаменателем C^m , числом членов $(n - 1)$ и суммой членов S , причем

$$S = \frac{C^{(n-1)m} - 1}{C^{(n-1)m} \cdot (C^m - 1)}.$$

Если иметь $C^{(n-1)m} \geq 40$, то в числителе можно пренебречь единицей. При этом

$$S = \frac{C^{(n-1)m}}{C^{(n-1)m} \cdot (C^m - 1)} = \frac{1}{C^m - 1}$$

и

$$\Theta = \frac{K^m}{V_n^m} - \frac{\tau}{C^m - 1}. \quad (2)$$

В последнем выражении

V_n — скорость, при которой произошло затупление инструмента,

τ — отрезок времени, в продолжение которого инструмент работал на каждой ступени скорости,

C — коэффициент повышения скорости,

Θ — отрезок времени, который проработал инструмент на последней ступени скорости до затупления.

Все эти величины известны, и в уравнении (2) неизвестными являются величины k и m , входящие в уравнение (1). Для определения их нужно иметь еще одно уравнение и для получения его проводим второй опыт на постоянной скорости V_n . На этой скорости инструмент будет иметь стойкость T_n , причем

$$T_n = \frac{K^m}{V_n^m}.$$

Определив T_n и подставив его в уравнение (2), получим

$$\Theta = T_n - \frac{\tau}{C^m - 1}, \quad (3)$$

отсюда

$$m = \frac{\lg \left\{ \frac{\tau}{T_n - \Theta} + 1 \right\}}{\lg C}, \quad (4)$$

$$K = V_n \cdot T_n^{\frac{1}{m}}. \quad (5)$$

Таким образом, проведя два опыта, определяем интересующие нас величины K и m .

Оба эти опыта будут кратковременными. Первый из них займет отрезок времени $\tau(n-1) + \Theta$, второй, проведенный на высокой скорости резания V_n , займет отрезок времени больше Θ , но меньше $\Theta + \tau$.

Продолжительность работы на каждой ступени скорости следует брать небольшую, именно $\tau = 3-4$ мин., число ступеней скорости желательно получить $n = 4-6$. При этом длительность первого опыта будет в пределах 12--24 минуты, второго не более 6--8 минут.

Имея величины K и m , мы можем по уравнению (1) определить скорость резания для любой стойкости, но нужно представлять себе, что, проведя лишь два опыта, мы получим лишь приблизительные значения K и m . Для получения точных значений двух опытов недостаточно, так как каждый опыт дает неизбежные более или менее значительные ошибки и ввиду возможного колебания твердости обрабатываемой болванки и ввиду некоторой разницы режущих качеств разных резцов, применяемых при опытах (хотя бы эти резцы и были совершенно одинаково изготовлены), и ввиду возможного незначительного колебания скорости резания в пределах каждого опыта. Даже если в двух опытах был применен один и тот же резец, то и при этом возможно некоторое изменение его режущих качеств по мере переточки его. Все эти причины, каждая в отдельности оказывая малосущественное влияние, в совокупности могут дать заметное отклонение. Поэтому для получения точных значений K и m двух опытов недостаточно.

При нахождении точных значений K и m нужно считать необходимым проведение 4--6 опытов. При этом первый опыт проводится на ступенчато-меняющейся скорости и служит для нахождения той области скоростей, в которой следует проводить следующие опыты, чтобы получить удобные значения стойкости (не слишком длительные и не очень кратковременные). Если при первом опыте затупление резца произошло на скорости V_n , то второй опыт можно провести на скорости V_{n-1} , третий на скорости V_{n-2} . Стойкости, полученные при этих скоростях, не будут очень значительными и покажут, при каких скоростях следует проводить следующие (четвертый, пятый и т. д.) опыты.

Важно при проведении первого опыта (на ступенчатой скорости) удачно выбрать величину C —коэффициент повышения скорости. При выводе уравнения (2) мы указали, что точность вывода будет достаточна, если $C^{(n-1)m} \geq 40$. Это неравенство может послужить для выбора величины C . Значение m зависит в основном от рода инструмента, и приблизительно мы его знаем. Число ступеней скорости желательно иметь 4--6. Поэтому, если взять $n = 5$ и $C^{(n-1)m} \cong 40$, то

$$\lg C \cong \frac{0,4}{m}$$

и величина C для различных m получит значения, представленные в таблице 2.

m	4	2	3	5	8	10	12	15	20
C	2,5	1,6	1,35	1,2	1,12	1,1	1,08	1,06	1,05

Удобство метода ступенчатой скорости для определения области скоростей, пригодной для экспериментов, может быть проиллюстрировано простым примером.

Предположим, что первая ступень скорости V_1 взята нами такой, что, если бы мы работали на ней до затупления, то стойкость была бы $T_1 = 1000$ минут, что было бы неприемлемо для проведения опыта при постоянной скорости, ввиду большой длительности опыта. Если опыт проводится ступенчатой скоростью и для τ взято значение $\tau = 3$ минуты, а значение C выбрано по таблице 2, то опыт будет протекать следующим образом:

$$V_1; T_1 = 1000 \text{ мин.}; \tau = 3 \text{ мин.}; T_1 - \tau = 997 \text{ мин.}$$

$$V_2 = CV_1; T_2 = \frac{T_1 - \tau}{C^m} = \frac{997}{2,5} = 398,8 \text{ мин.}; T_2 - \tau = 395,8 \text{ мин.}$$

$$V_3 = CV_2; T_3 = \frac{T_2 - \tau}{C^m} = \frac{395,8}{2,5} = 158,32 \text{ мин.}; T_3 - \tau = 155,32 \text{ мин.}$$

$$V_4 = CV_3; T_4 = \frac{T_3 - \tau}{C^m} = \frac{155,32}{2,5} = 62,13 \text{ мин.}; T_4 - \tau = 59,13 \text{ мин.}$$

$$V_5 = CV_4; T_5 = \frac{T_4 - \tau}{C^m} = \frac{59,13}{2,5} = 23,65 \text{ мин.}; T_5 - \tau = 20,65 \text{ мин.}$$

$$V_6 = CV_5; T_6 = \frac{T_5 - \tau}{C^m} = \frac{20,65}{2,5} = 8,26 \text{ мин.}; T_6 - \tau = 5,26 \text{ мин.}$$

$$V_7 = CV_6; T_7 = \frac{T_6 - \tau}{C^m} = \frac{5,26}{2,5} = 2,1 = \theta.$$

Таким образом, опыт проведен на 7 ступенях скорости и занял время $(n-1)\tau + \theta = 20,1$ мин вместо 1000 минут. В приведенном примере взято $C^m = 2,5$, что будет всегда иметь место, если величина C взята по таблице 2.

Конечно при выполнении опыта, не зная точно величины m , мы сможем лишь ориентировочно выбрать величину C , примерно оценив возможное значение m , но это ничего принципиально не изменит ни в методике опыта, ни в его результатах.

Если опыт на ступенчатой скорости проводится для того, чтобы в совокупности со вторым опытом дать возможность по уравнениям (4) и (5) определить значения K и m , то изложенная методика обладает тем недостатком, что величина θ получается очень небольшой ($\theta \ll \tau$), благодаря чему за ее достоверность особенно ручаться нельзя. Кроме того, опыт, проведенный на ступенчатой скорости с малыми значениями τ , представляет собой опыт резания с перерывами, что будет несколько изменять закономерность стойкости.

Чтобы избежать этих недостатков, методику проведения опыта ступенчатой скорости следует видоизменить следующим образом. Переходя со

ступени на ступень, следует время работы на каждой следующей ступени увеличивать по некоторому геометрическому ряду.

Тогда будем иметь

Ступени скорости	V_1	$V_2 = CV_1$	$V_3 = C^2V_1$	$V_{n-1} = C^{n-2}V_1$	$V_n = C^{n-1}V_1$
Длительность резания на данной ступени.	τ_1	$\tau_2 = e\tau_1$	$\tau_3 = e^2\tau_1$	$\tau_{n-1} = e^{n-1}\tau_1$	6

Стойкость на первой ступени скорости V_1 пусть будет T_1 . После того как на первой ступени инструмент проработал τ_1 минут и скорость переключена на V_2 , остаток стойкости инструмента при скорости V_2 будет

$$(T_1 - \tau_1) \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m = \frac{T_1 - \tau_1}{C^m}.$$

После работы при V_2 в течение отрезка времени $\tau_2 = e \cdot \tau_1$, инструмент на следующей ступени скорости (V_3) будет обладать остатком стойкости

$$\left(\frac{T_1 - \tau_1}{C^m} - \tau_2\right) \cdot \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^m = \frac{T_1 - \tau_1}{C^{2m}} - \frac{\tau_2}{C^m}.$$

Проводя дальше подобные рассуждения, на скорости V_n получим:

$$\Theta = \frac{T}{C^{(n-1)m}} - \left[\frac{\tau_1}{C^{(n-1)m}} + \frac{\tau_2}{C^{(n-2)m}} + \frac{\tau_3}{C^{(n-3)m}} + \dots + \frac{\tau_{n-2}}{C^{2m}} + \frac{\tau_{n-1}}{C^m} \right]$$

или

$$\Theta = \frac{K^m}{V_n^m} - \tau_1 \left[\frac{1}{C^{(n-1)m}} + \frac{e}{C^{(n-2)m}} + \frac{e^2}{C^{(n-3)m}} + \dots + \frac{e^{n-3}}{C^{2m}} + \frac{e^{n-2}}{C^m} \right].$$

При $e > 1$; $C > 1$ и $n > 1$, в квадратных скобках помещается возрастающая геометрическая прогрессия с знаменателем eC^m и числом членов $(n-1)$. Сумма членов ее будет

$$S = \frac{e^{n-1} \cdot C^{m(n-1)} - 1}{eC^{nm} - C^{(n-1)m}}$$

В числителе можно пренебречь единицей. При этом будем иметь

$$S = \frac{e^{n-1}}{eC^m - 1};$$

$$\Theta = \frac{K^m}{V_n^m} - \frac{\tau_1 \cdot e^{n-1}}{eC^m - 1}, \quad (6)$$

или

$$\Theta = T_n - \frac{\tau_n}{eC^m - 1}. \quad (7)$$

Здесь

T_n — стойкость инструмента, полученная при испытании на постоянной скорости последней ступени V_n ,

τ_n — отрезок времени, который должен был бы проработать инструмент на последней ступени скорости, если бы не наступило затупления ($\tau_n = \tau_1 \cdot e^{n-1}$),

Θ -- действительный отрезок времени, который проработал инструмент до затупления на последней ступени скорости,

C -- коэффициент увеличения скорости,

e -- коэффициент увеличения времени работы на каждой ступени скорости.

Проведя первый опыт на ступенчато-меняющейся скорости и определив из него величину Θ , затем проведя второй опыт на постоянной скорости V_n и получив стойкость T_n , определяем величину m

$$m = \frac{\lg \left\{ \frac{\tau_n - 1}{T_n - \Theta} + \frac{1}{e} \right\}}{\lg C} \quad (8)$$

Время, затрачиваемое на опыт при ступенчатой скорости, будет

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_{n-1} + \Theta = \tau_1 (1 + e + e^2 + \dots + e^{n-2}) + \Theta,$$

то есть

$$\tau_1 \cdot \frac{e^{n-1} - 1}{e - 1} + \Theta.$$

Пусть для испытуемого инструмента действительна зависимость

$$V = \frac{40}{T^{0,1}}.$$

При испытании взято:

$$V_1 = 20 \text{ м/мин.};$$

$$\tau_1 = 2 \text{ мин.},$$

$$e = 1,5;$$

$$C = 1,1.$$

Ступени скорости при испытании будут

V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
20	22	24,2	26,6	29,3	32,2

Длительности опыта на каждой ступени

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6
2	3	4,5	6,75	10,1	15,15

Если бы работа до затупления велась на первой ступени при $V = 20 \text{ м/мин.}$, то стойкость была бы

$$T_1 = \left(\frac{40}{20} \right)^{10} = 1024 \text{ мин.}$$

На первой ступени длительность работы $\tau = 2 \text{ мин.}$, и поэтому остаток стойкости, приведенный ко второй ступени, будет

$$\frac{T_1 - \tau_1}{C^m} = 393,7 \text{ мин.}$$

Длительность работы на второй ступени $\tau_2 = 3$ мин. и остаток стойкости приведенный, к третьей ступени, 150,5 мин. Длительность работы на третьей ступени $\tau_3 = 4,5$ мин. и остаток стойкости, приведенный к четвертой ступени, 56,6 мин.

Длительность работы на четвертой ступени $\tau_4 = 6,75$ мин. и остаток стойкости, приведенный к пятой ступени, 19,26 мин.

Длительность работы на пятой ступени $\tau_5 = 10,1$ мин. и остаток стойкости приведенный к шестой ступени, 3,50 мин. = θ .

Таким образом затупление происходит на шестой ступени. Затрата времени на первый опыт 30,58 минут.

Второй опыт производится на скорости $v_6 = 32,2$ со стойкостью

$$T_n = \left(\frac{40}{32,2} \right)^{10} = 8,75 \text{ мин.}$$

Ввиду того, что опыты на ступенчатой скорости выполняются с увеличивающимися от ступени к ступени отрезками времени, почти вся величина стойкости инструмента используется на двух последних ступенях скорости. Это иллюстрируется таблицей 3, в которой время резания на каждой ступени скорости выражено эквивалентным по стойкости временем на скорости первой ступени (V_1).

Таблица 3

V	v	n	Эквивалентное время на первой ступени скорости	
			В минутах	В % от общей стойкости на первой ступени
20	2	—	2	0,195
22	3	—	7,8	0,76
24,2	4,5	—	30,2	2,95
26,6	6,75	—	117,3	11,455
29,3	10,1	—	456	44,52
32,2	—	3,5	411	40,12

Таким образом более 84% стойкости используется на последних двух ступенях скорости, которые и являются поэтому основными и решающими. Естественно заключить, что влияние перерывов в резании при переключении со ступени на ступень здесь не может сколько-нибудь заметно сказаться, а значительная длительность опытов на последних ступенях скорости дает большую точность полученных результатов.

Заключение

В статье изложен метод ступенчатой скорости резания, дающий возможность при помощи одного опыта определить область скоростей, в которой следует проводить испытание инструмента или обрабатываемости металла.

При необходимости приближенного определения режущих качеств инструмента или обрабатываемости металла по изложенному методу достаточно проведения только двух опытов.

Замеченные опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Следует
71	Формула 8	$m = \frac{\lg \left\{ \frac{\tau_n - 1}{\tau_n - \Theta} + \frac{1}{e} \right\}}{\lg C}$	$m = \frac{\lg \left\{ \frac{\tau_n - 1}{\tau_n - \Theta} + \frac{1}{e} \right\}}{\lg C}$
82	Формулы 17 и 18	<i>A w ep</i>	<i>A w cp</i>
83	2 снизу	Проведенные	Приведенные
93	14 сверху	годы лет	годы
99	5 "	c st	const
99	6 "	величин <i>H</i> могут	величину <i>H</i> и могут
102	2 снизу	2,7(91	2,7(91 <i>S</i>) 0,535—0,006 <i>V</i>
104	7 "	свойством	смыслом
107	19 "	действие	влияние на
114	10 "	физических свойствах	физическом смысле
119	9 сверху	кривых поверхностей.	кривых.