

Технология и технологические машины



ДРЕВАЛЬ
Алексей Евгеньевич
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Инструментальная
техника и технологии»



ЛИТВИНЕНКО
Анатолий Васильевич
кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Инструментальная
техника и технологии»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УДК 621.951.7

Критерии оптимального износа машинных метчиков

А.Е. Древаль, А.В. Литвиненко

Рассмотрено соотношение между моментом разрушения машинных метчиков и моментами резбонарезания, величина которых зависит от износа инструмента. Установлена зависимость между максимальной допустимой величиной износа h_z и моментом разрушения метчиков. Величина h_z зависит от геометрических параметров и условий эксплуатации и является ограничением работоспособности метчиков.

Ключевые слова: режущий инструмент, метчик, износ, прочность, критерий, момент резания, момент разрушения.

The article considers a relationship between the tap destruction torque and the threading torque, which magnitude depends on the tool wear. The relationship between the maximum permissible wear value and the taps destruction torque has been established. The taps wear value depends on the tool geometric parameters and operating conditions being a limitation of taps working capacity.

Keywords: cutting tool, tap, tool wear, durability, criterion, cutting torque, destruction torque.

Максимальная величина износа режущего инструмента, при достижении которой ограничивается способность инструмента срезать припуск вследствие интенсивного изнашивания или разрушения, в соответствии с работой [1] принимается за величину оптимального износа $h_{\text{опт}}$. На кривых износа инструментов от времени работы этой величине обычно соответствует точка пересечения участка установившегося изнашивания с участком интенсивного изнашивания.

Износ инструмента, ограничивающий выполнение других требований к обработке резанием (точности, шероховатости, затраты энергии, расходу инструмента, производительности и т. п.), является критерием износа по определенному признаку оценки механической обработки. Очевидно, что часто используемая величина критерия равного износа является частным случаем, отражающим принцип слабого звена. Все значения износа, определяемые другими требованиями к обработке, будут меньше величины $h_{\text{опт}}$.

Работоспособность машинно-ручных метчиков ограничена их прочностью. Автор работы [2] предложил зависимость для расчета разрушающего момента, Н·м, исходя из того, что прочность метчика лимитируется прочностью поперечного сечения рабочей части, ослабленной стружечными канавками:

$$M_{\text{разр}} = \sigma_s r_{\text{вн}}^3 / k_k \quad (1)$$

где σ_s — предел прочности при кручении, Н/мм²; $r_{\text{вн}}$ — внутренний радиус резьбы метчика, мм; k_k — коэффициент концентрации напряжений, учитывающий количество стружечных канавок z инструмента.

В статье [3] выполнены уточнения в схемах разрушения метчиков, исследовано напряженное состояние метчиков методом фотоупругости. Установлено, что наиболее нагруженной частью метчика является вершина режущего профиля. Здесь нормальные напряжения сжатия до 3 раз превышают напряжения растяжения $\sigma_{\text{ном1}}$ и сжатия $\sigma_{\text{ном2}}$ в глубине стружечных канавок, рассчитанные по схеме чистого кручения (рис. 1). При уменьшении ширины спинки зуба нормальные напряжения увеличиваются, а опасная зона из вершины режущего профиля перемещается в область ножки зуба метчика. Так, изменение ширины зуба модели для М10 в масштабе 1:10 от 23 до 14 мм приводит к увеличению количества полос (изохром) в зоне II и III с 5 до 9, что соответствует увеличению $\sigma_{\text{ном1}}$ в 1,73 раза. Исследования показывают, что величины переднего и заднего углов оказывают существенное влияние на σ_{max} и мало влияют на значения $\sigma_{\text{ном1}}$ и $\sigma_{\text{ном2}}$.

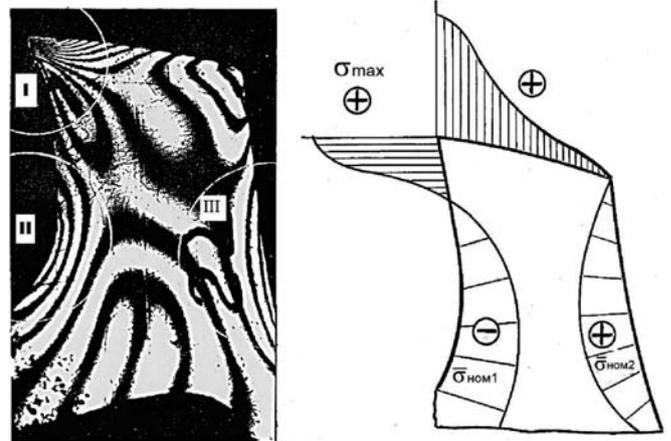


Рис. 1. Распределение напряжений в зубе метчика

Авторами данной статьи рассмотрены возможные соотношения прочности режущего профиля и поперечного сечения метчиков.

1. Прочности режущего профиля и поперечного сечения соизмеримы, т. е. $\sigma_{\text{р. проф}} \approx \sigma_{\text{п. сеч}}$. Такое соотношение характерно для мелкогабаритного инструмента ($d \leq 10$ мм), которому свойственна большая доля внезапных отказов вследствие того, что прочность поперечного сечения незначительна [2], ширина зуба также небольшая и опасная зона перемещается в область ножки зуба.

Это подтверждается результатами производственных испытаний метчиков, показывающими высокий процент разрушений мелкогабаритных метчиков (рис. 2). В этом случае метчики «чувствительны» к росту нагрузки, обусловленной случайными причинами и увеличением износа, что отражается в резком воз-

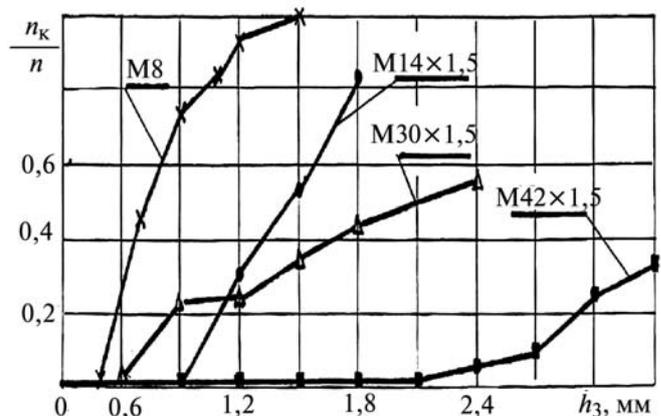


Рис. 2. Зависимость доли функциональных отказов метчиков от величины износа задней поверхности

растании доли разрушений с увеличением износа.

2. Прочность режущего профиля меньше прочности поперечного сечения метчика, т. е. $\sigma_{р. проф} < \sigma_{п. сеч}$. Такое соотношение характерно для метчиков размерами М12...М18. В этом случае лимитирующей является прочность режущего профиля. При определенных значениях $M_{рез}$ возникают выкрашивания и сколы, которые инициируют рост силовых и температурных нагрузок и приводят к разрушению метчиков. Поэтому для метчиков размерами М12...М18 работоспособность также определяется прочностью поперечного сечения. Однако чувствительность к росту нагрузки в этом случае ниже, что находит отражение в изменениях долей разрушений. Процент поломок метчиков этих размеров значителен и составляет 8...55 %.

3. Прочность режущего профиля метчиков во много раз меньше прочности поперечного сечения, т. е. $\sigma_{р. проф} \ll \sigma_{п. сеч}$. Такое соотношение характерно для метчиков размерами $d \geq M20$. Наиболее ярким проявлением функциональных отказов является появление сколов, выкрашиваний профилей. В этом случае поломки инструмента встречаются редко; наблюдается аварийный останов технологического оборудования из-за недостатка мощности привода, срабатывают предохранительные устройства.

В общем случае причиной функционального отказа метчиков является полное или частичное разрушение инструмента из-за возрастания нагрузки на его рабочих элементах. Таким образом, величина износа рабочего элемента, при которой момент резания $M_{рез}$ достигает ограничения по прочности $M_{разр}$, является критерием оптимального износа $h_{опт}$ инструмента. Схема формирования функционального отказа представлена на рис. 3.

Существующие зависимости моментов резания при резбонарезании метчиками получены в основном без учета величины износа инструмента, являющегося аргументом функции момента резания. Влияние износа обычно учитывается поправочными коэффициентами на конечное состояние инструмента, когда достигается значение равного износа.

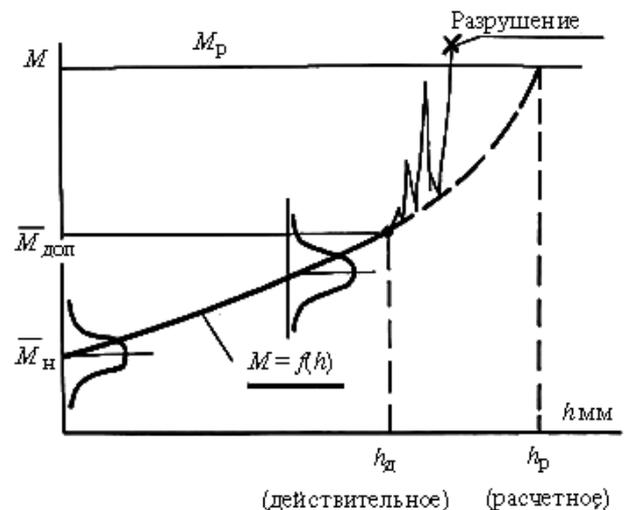


Рис. 3. Схема формирования функциональных отказов метчиков

Авторами данной статьи проведены однофакторные исследования изменения момента резбонарезания в углеродистой конструкционной стали 45 метчиками из стали Р6М5 с использованием в качестве СОЖ 5%-го водного раствора «Укринол-1». Получены частные зависимости момента резания от основных параметров нарезаемой резьбы (d, p, φ). Для определения зависимости момента резания от величины износа метчики М10×1,5Н1, М12×1,5Н1, М16×1,5Н1 с $z = 3$ испытывались до разрушения. На основе частных зависимостей однофакторных экспериментов получено общее уравнение момента резания (2) в допущении, что степень влияния каждой переменной на конечный результат не зависит от уровня любой другой переменной.

При резбонарезании во всем скоростном диапазоне отказ метчиков происходит из-за износа задней поверхности последнего режущего профиля, зависимость момента резания от износа имеет вид

$$M_{рез} = 1,113 \cdot 10^{-2} d^{2,293} P^{0,4567} \varphi^{-0,3163} z^{0,2} e^{0,8882h/z} \quad (2)$$

где d — наружный диаметр метчика, мм; p — шаг резьбы метчика, мм; φ — угол режущего конуса метчика, град; z — число зубьев метчика.

В приведенной зависимости влияние числа зубьев метчика z на момент резания оценивалось на основании работы [4]. Точность аппроксимации зависимости (2) не превышала 10 %, что достаточно для инженерных расчетов. Вид зависимости (2) отличен от представ-

ленных в других источниках. Ранее разработанные модели не учитывают влияние ряда геометрических параметров режущей части, вклад которых может быть учтен поправочными коэффициентами, представленными в справочной литературе.

Однако, как показали экспериментальные проверки на базе испытания нескольких партий инструмента, если принять, что характер зависимостей $M_{рез} = f(h)$ монотонно возрастающий, то расчетные значения критерия $h_{опт. расч}$ по зависимости (2) будут существенно превышать действительные значения критерия оптимального износа $h_{опт. дейст.}$ Следовательно, характер изнашивания инструмента претерпевает качественные изменения с увеличением износа рабочих поверхностей.

При определенной величине износа на осциллограммах имеют место всплески моментов резания, по величине соизмеримые с моментом разрушения инструмента (рис. 4). Источником «всплесков» является адгезионное схватывание между изношенной задней поверхностью метчика и обрабатываемой поверхностью. Микрофотографии разрушенного инструмента в обрабатываемом отверстии представлены на рис. 5. Видно, что режущие

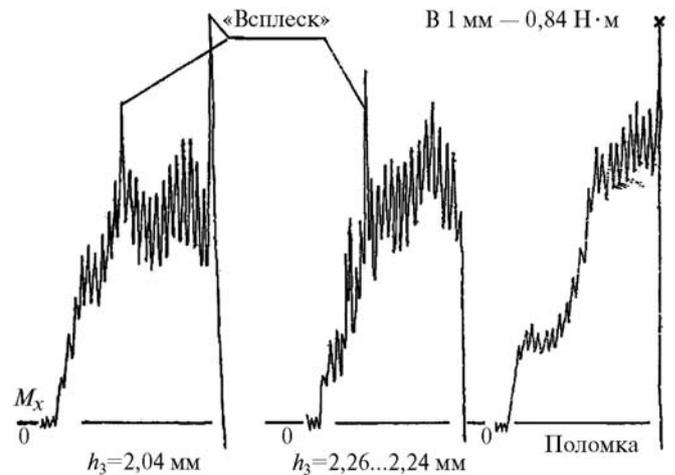


Рис. 4. Характерный вид осциллограмм $M_{рез}$ по мере роста износа задней поверхности метчика: $M10 \times 1,5H1$; $V = 0,094$ м/с; $\phi = 17^\circ$; $z = 3$, сталь 45; 197–205 НВ

и калибрующие профили метчика охвачены участками сильно деформированного обрабатываемого материала.

Характерные зависимости изменения средних значений момента резания от износа инструмента приведены на рис. 6. На монотонно возрастающей зависимости наблюдаются всплески моментов резания, которые возникли в течение цикла обработки. Представленные данные подтверждают, что причиной отказов

Заготовка сталь 45



а



б

Рис. 5. Микрофотографии режущих (а) и калибрующих (б) профилей метчиков в контакте с обрабатываемым материалом в момент разрушения:

метчик $M16 \times 1,5H1$; P6M5; $V = 4,5$ м/мин

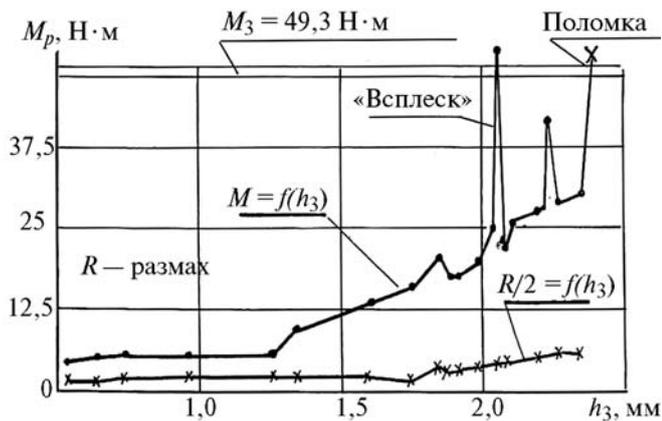


Рис. 6. Зависимость момента резбонарезания от величины износа h_3 метчика:
M10×1,5H1; $V = 5,64$ м/мин; сталь 45; 197–205 НВ

инструмента является кратковременное скачкообразное изменение момента резания, возникающее при определенных значениях износа инструмента.

Таким образом, инструменты можно эксплуатировать до того значения момента $M_{доп}$, которое предшествует появлению всплесков момента резания, обусловленных адгезионным схватыванием. В свою очередь $M_{доп}$ является функцией $h_{доп}$. Должно выполняться соотношение (см. рис. 3)

$$M_{рез} \leq M_{доп} = M_{разр} / K, \quad (3)$$

где K — коэффициент, характеризующий соотношение между $M_{разр}$ и $M_{доп}$ на данном режиме $h_{опт}$, возникают обработки, при котором с учетом износа режущих элементов инструмента h_d , равным качественным изменениям зависимости $M_{рез} = f(h)$.

С учетом зависимостей (1) и (2) для резбонарезания метчиками после преобразований из соотношения (3) имеем

$$h_{опт.з} \leq \frac{1}{0,8882} \times \ln \left[\frac{\sigma_s r_{вн}^3 \varphi^{0,3163}}{K k_k 1,113 \cdot 10^{-2} d^{2,293} p^{0,4567} z^{0,2}} \right], \text{ мм.} \quad (4)$$

В представленные зависимости входит коэффициент K , который сам по себе является сложной функцией большого количества факторов. В первую очередь это физико-химические свойства контактирующих материалов инструмента и заготовки, определяющие способность их к адгезионному схватыванию. Это

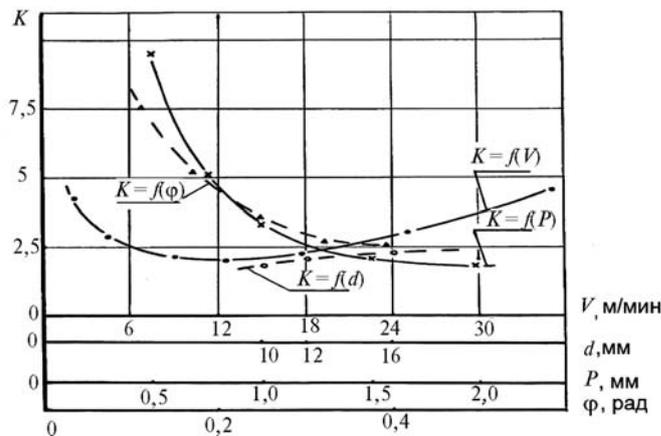


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K = M_{разр} / M_{доп}$ от основных параметров процесса резбонарезания

параметры режима резания, определяющие энергетическое состояние контактных поверхностей; геометрические особенности режущих лезвий, определяющие условия теплоотвода из зоны резания, распределение напряжений, дискретность контакта и др. На современном уровне знаний процесса резания не представляется возможным дать общее решение по определению коэффициента K . Поэтому для определения $h_{опт}$ принят эмпирический подход, заключающийся в том, что для определенного класса обрабатываемого материала в пределах области возможных режимов резания находим частные зависимости $h_{опт}$ в функции основных параметров процесса обработки и с их использованием определяем коэффициент K . Полученные значения K анализируются, обобщаются и посредством математической обработки им придается вид функциональных зависимостей от основных параметров процесса обработки. Данный подход является традиционным и широко применяется в технологии машиностроения.

При обработке типowego представителя углеродистых конструкционных сталей — стали 45 197–205 НВ получены частные зависимости критерия оптимального износа $h_{опт}$ при резбонарезании от основных параметров режима резания. Испытания инструментов проводились до их поломки. Каждый опыт повторялся не менее 3 раз. Частные зависимости $h_{опт}$ при резбонарезании машинно-ручными метчиками представлены в табл. 1.

Таблица 1

Частные зависимости критерия оптимального износа метчиков от основных параметров процесса резания, мм

Параметр	Размерность	Вид зависимости
V	м/с	$h_{\text{опт.з}} = 9,57V^{0,551}e^{-2,809V}$
$\sin \varphi$	—	$h_{\text{опт.з}} = 1055 \sin \varphi^{3,159}e^{-8,381 \cdot \sin \varphi}$
P	мм	$h_{\text{опт.з}} = 5,17p^{1,44}e^{-0,8386P}$
D	мм	$h_{\text{опт.з}} = 36,53d^{-2,131}e^{0,1943d}$
НВ	кг/мм ²	$h_{\text{опт.з}} = 41,46\text{НВ}^{-0,571}$

Обобщенная зависимость построена на основе частных зависимостей и имеет вид:

$$h_{\text{опт.з}} = 3,6075 \cdot 10^6 V^{0,551} \sin \varphi^{3,159} p^{1,44} d^{-2,131} \times \text{НВ}^{-0,571} e^{-2,809V-8,381 \sin \varphi-0,8386P+0,1943d}, \text{ мм.} \quad (5)$$

Проведена проверка зависимости (5) на нескольких партиях метчиков объемом не менее 20 шт. Относительная погрешность расчетного значения $h_{\text{опт.р}}$ и среднего экспериментального не превышала 13,5 %.

Наличие экспериментально полученной зависимости (5) позволяет установить функциональные связи коэффициента K с основными параметрами процесса обработки (рис. 7) и получить обобщенную зависимость $K = f(v, s_0(P), d, \text{НВ}$ и др.) при обработке углеродистых конструкционных сталей:

$$K = 4,537 \cdot 10^{-2} V^{-0,8653} e^{4,407V} p^{-1,238} d^{0,336} \varphi^{-0,91}. \quad (6)$$

Для оценки достоверности обобщенных критериальных уравнений при функциональных отказах инструмента и оценки параметров распределения $h_{\text{опт}}$ выполнены производственные испытания нескольких партий машинных метчиков в производственных условиях. Отдельные результаты испытаний представлены

в табл. 2. Объем испытанных партий метчиков составлял не менее 20 шт., процесс нарезания резьбы осуществлялся с использованием СОЖ — 5%-ный водный раствор «Укринол-1». Испытания проводились до появления обширных сколов или разрушения инструмента.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, расчетные значения критерия оптимального износа $h_{\text{опт.р}}$, полученные по критериальной зависимости (5), хорошо согласуются с результатами производственных испытаний $h_{\text{опт.э}}$. Наблюдается тенденция некоторого завышения расчетных значений $h_{\text{опт.р}}$ по сравнению со средними значениями $h_{\text{опт.э}}$, полученными экспериментально. Это объясняется тем что в уравнении (5) использованы результаты лабораторных испытаний, когда удается поддерживать условия экспериментов на строго фиксированном уровне, чего трудно достичь в производственных испытаниях.

Испытания показали, что критерий оптимального износа является случайной величиной. Для каждой партии испытанных инструментов построены гистограммы распределения критериев износа $h_{\text{опт}}$ и определены характеристики распределения: среднее значение $h_{\text{опт.э}}$, среднеквадратическое отклонение σ_h , коэффициент вариации Var_h . Проверка показывает, что распределения $h_{\text{опт.э}}$ не противоречат закону Гаусса, коэффициент вариации в большинстве случаев меньше 0,3 и не превышает 0,35. Это позволяет принять, что распределение $\bar{h}_{\text{опт.э}}$ согласуется с законом Гаусса. Тогда критерий оптимального износа, обеспечивающий безотказную работу с заданной вероятностью, рассчитывается по следующей зависимости:

Таблица 2

Средние значения критериев оптимального износа задних поверхностей метчиков, их среднеквадратические отклонения, коэффициенты вариации и доверительные интервалы

d , мм	p , мм	φ , град	V , м/с	НВ	$h_{\text{опт.э}}$, мм	σ_h	Var_h	$\pm \Delta h$, мм	$h_{\text{опт.р}}$, мм	δ , %
10	1,25	18	0,2133	197	1,65	0,189	0,114	0,143	1,9	13,2
12	1,75	10,5	0,1075	229	0,7	0,132	0,2	0,06	0,93	24,7
14	1,5	13,5	0,0883	221	1,23	0,292	0,238	0,133	1,35	8,9
16	1,5	17,5	0,105	205	1,8	0,3935	0,275	0,219	2,08	13,5
22	1,5	12	0,1033	211	1,71	0,1114	0,065	0,14	1,97	13,2
30	1,5	6	0,0617	180	1,28	0,3623	0,28	0,216	1,38	7,2

$$h_{\text{опт.}\gamma} \equiv \bar{h}_{\text{опт.}\varepsilon} (1 - U_p \text{Var}_h), \quad (7)$$

где U_p — квантиль нормального распределения; Var_h — коэффициент вариации величины оптимального износа; $h_{\text{опт}}$ — среднее значение критерия оптимального износа, рассчитанное по зависимостям (4) и (5).

Наиболее общей является зависимость (4), поскольку основана на взаимосвязи прочностных характеристик метчиков с условиями его нагружения, определяемыми физико-механическими свойствами материала заготовки и параметрами режима обработки. В случае обработки конструкционных углеродистых сталей значение коэффициента K , входящего в уравнение (4), может быть определено по зависимости (6). При резбонарезании в заготовках из других материалов необходимо устанавливать значения коэффициента K на основе кратких однофакторных экспериментов.

Выводы

1. Увеличение износа режущих и калибрующих профилей метчиков приводит к качественному изменению динамических процессов обработки. Монотонный характер увеличения момента резания с ростом износа при определенной его величине прерывается всплесками момента, которые обусловлены кратковременными адгезионными схватыва-

ниями изношенных поверхностей инструмента и обрабатываемой поверхности. Превышение всплеском момента разрушения метчика обуславливает его функциональный отказ.

2. Величина износа, предшествующая появлению всплесков момента резбонарезания, ограничивает работоспособность и является оптимальным износом $h_{\text{опт}}$ метчиков. Установлено, что величина $h_{\text{опт}}$ — функция параметров режима резания и имеет экстремальный характер. Разработаны модели для расчета значений $h_{\text{опт}}$ при обработке углеродистых конструкционных сталей.

Литература

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
2. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб. М.: Машиностроение, 1968. 116 с.
3. Андриевская С.И., Литвиненко А.В. Изучение напряженного состояния метчиков методом фотоупругости // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 12. С. 118–123.
4. Рождественский Л.А. Определение крутящего момента при нарезании резьбы метчиками // Резание металлов. Машгиз. № 12. 1950. С. 47–56.

Статья поступила в редакцию 15.11.2011