

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ УПРУГИМ ТЕНЗОМЕТРОМ

Г. Л. КУФАРЕВ

(Представлено проф. докт. техн. наук А. М. Розенбергом)

Изучение многих вопросов теории резания металлов связано с необходимостью измерения величины сил, действующих на резец в процессе резания.

Основным принципом работы аппаратуры, применяемой в настоящее время для этой цели, является регистрация упругого изгиба резца или другого элемента, жестко связанного с ним, под действием измеряемых сил. При этом желательно иметь величину прогиба упругого элемента минимальной. Это обеспечивает большую жесткость динамометра, тем самым приближая процесс резания резцом, закрепленным в динамометре к процессу, который мы имеем в производственных условиях.

Эксплуатация динамометра малой жесткости приводит к целому ряду затруднений: в большом диапазоне скоростей резания возникают вибрации, искажающие процесс деформации стружки, изменяется действительная геометрия резца, сечение среза и т. д.

Наиболее удачными с этой точки зрения являются динамометры, имеющие микронные перемещения упругого элемента, однако во многих случаях это перемещение можно допустить и до величины, достигающей при максимальной нагрузке на резце 0,1 мм.

Для надежной регистрации малых перемещений в настоящее время применяют электрические датчики, работающие на самых различных принципах. Импульсы последних усиливаются и подаются на гальванометры или осциллограф. Не останавливаясь на существующих видах электрических датчиков, следует отметить, что эксплуатация их связана со значительными затруднениями, ввиду сложности электрической части аппаратуры. К тому же электрическая схема вносит обязательно свои погрешности в показания приборов, причем эти погрешности порой чрезвычайно трудно учесть.

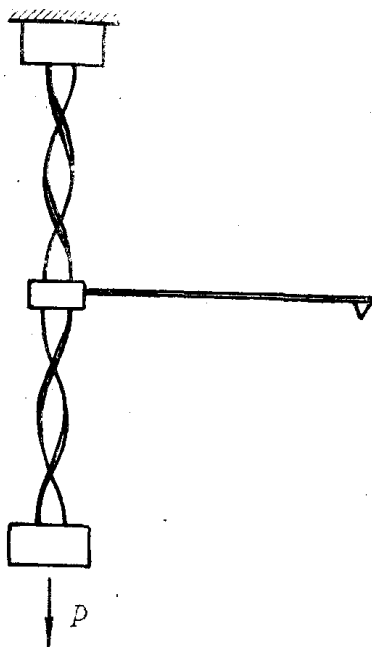
Именно поэтому до последнего времени продолжают работы по совершенствованию механической записи, которая обычно несравненно проще в эксплуатации и надежнее в работе.

В последние годы на кафедре станки и резание металлов Томского политехнического института были изготовлены, исследованы и применены для регистрации сил резания так называемые упругие тензометры, которые в увеличенном масштабе производят запись упругих перемещений, вызываемых действием сил резания.

Основным звеном упругого тензометра является плоская металлическая пружина, одна половина которой завит в одну сторону, другая—в противоположную (фиг. 1). При растяжении такой пружины происходит поворот ее средней части, на которой закреплена стрелка, оканчивающаяся пером.

Принцип, положенный в основу упругого тензометра, широко используется как зарубежной, так и отечественной приборостроительной промышленностью. На этом принципе работают пружинные микрометры [1], име-

ющие сильно завитые (на пластический угол порядка 10π) механические пружины очень малого поперечного сечения (от $0,3 \times 0,004$ мм до $0,25 \times 0,01$ мм). Г. А. Апарин и И. Е. Городецкий [1] указывают, что отношение угла поворота такой пружины к величине удлинения ее изменяется в зависимости от поперечного сечения и степени начального закручивания.



Фиг. 1

Для осуществления записи пером величины измеряемой силы потребовалась весьма жесткая, т. е. значительно большего поперечного сечения, пружина, однако чувствительность такой пружины оказалась чрезвычайно малой. Исследования работы пружин различного поперечного сечения, имеющих различную длину и степень начального закручивания, показали, что необходимую чувствительность при достаточной жесткости можно получить, поставив в один измерительный элемент несколько пружин сравнительно небольшого сечения.

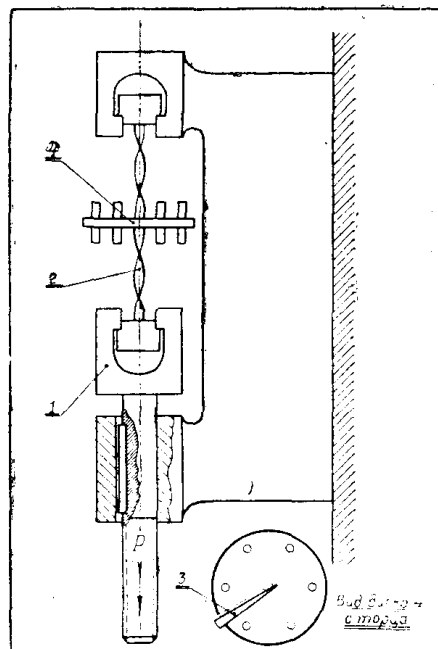
Предлагаемый упругий тензометр состоит из 2—4 собранных в пакет и закрученных на определенный угол плоских закаленных пружин из стали У10А. Поперечное сечение каждой пружины от $0,2 \times 2,15$ мм до $0,16 \times 1,5$ мм, длина закрученной части пружины 40—120 мм. Для изготовления упругого тензометра может быть использована готовая часовая пружина соответствующего сечения.

Еще до закручивания (закручивание производится в закаленном состоянии) концы пружин запрессовываются в головки при помощи разрезного конуса. Эти головки служат опорой при закручивании и при эксплуатации. Такое устройство упругого тензометра позволяет надежно закрепить его в динамометре и легко заменить в случае необходимости.

Закручивание пружин производится в специальном приспособлении, принципиальная схема которого изображена на фиг. 2.

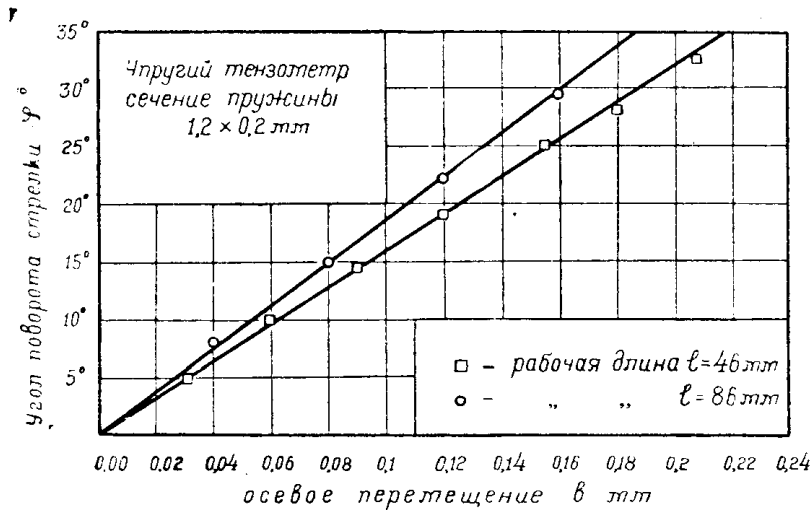
К нижнему зажиму 1 подвешивается груз P , величина которого создает в пружинах 2 напряжения, примерно на 20% ниже предела текучести. Этот постоянный груз обеспечивает равномерность пластического скручивания пружины. При помощи плоского клина 3 к середине пружин закрепляется диск 4, вращением которого производится закручивание пружины.

Для равномерности пластической деформации по всей длине и во избежание поломки пружин закручивание производится постепенно, путем медленного наращивания величины пластического угла закручивания. После того, как необходимый угол пластического закручивания (от 2 до 4π) будет достигнут, пружина остается под нагрузкой в течение одних-двух суток.



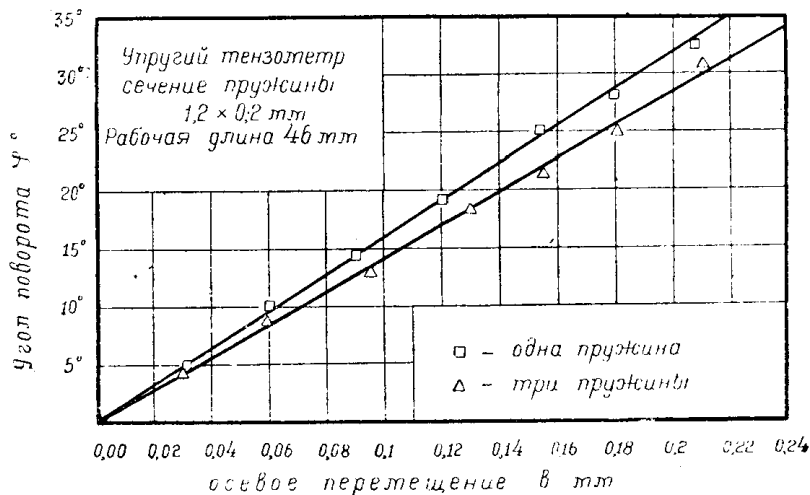
Фиг. 2

Исследование чувствительности и сравнение разных упругих тензодатчиков было проведено на приспособлении, изображенном на фиг. 2. Осевое перемещение, создаваемое гайкой, накрученной на зажим 1, измерялось индикатором. К среднему сечению пружин крепилась стрелка, поворот которой фиксировался по лимбу, прикрепленному неподвижно к корпусу приспособления. Перед каждым испытанием создавался предварительный натяг системы, величина которого определялась поворотом стрелки на $60-90^\circ$.



Фиг. 3

Проведенные испытания показали, что чувствительность упругих тензодатчиков увеличивается с увеличением рабочей длины (фиг. 3) и уменьшается с увеличением числа пружин измерительного элемента (фиг. 4).

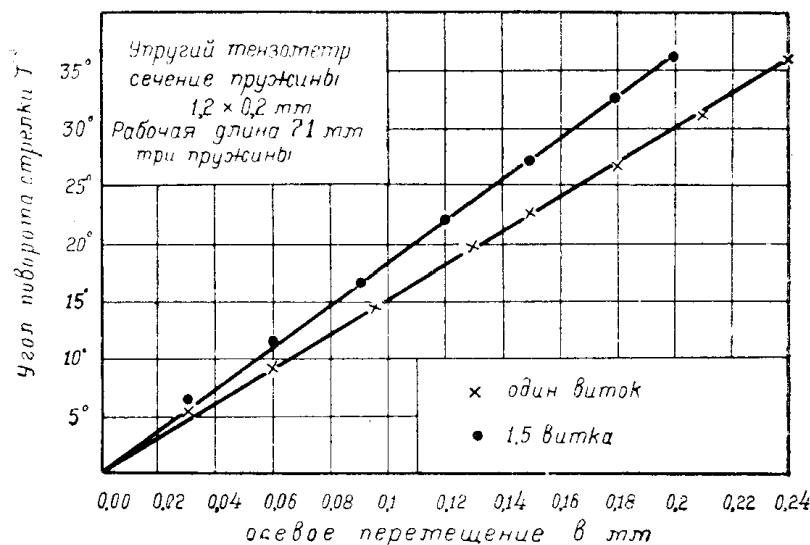


Фиг. 4

Что же касается степени пластического закручивания, то увеличение ее приводит к повышению чувствительности только до определенного значения, характерного для пружины данного размера. Пример влияния угла пластического закручивания на чувствительность тензодатчика приведен на фиг. 5¹⁾.

¹⁾ Графики на фиг. 3, 4 и 5 построены по данным Седокова Л. М.

Угол упругого поворота стрелки для испытанных упругих тензометров на 0,1 мм осевого перемещения изменялся от 14°10' до 18°45', причем он всегда оставался прямо пропорциональным осевому перемещению. Такой угол поворота при длине стрелки $l = 100 \div 150$ мм соответствует увеличению перемещений в 250—500 раз.



Фиг. 5

Весьма важным условием, определяющим надежность или даже возможность применения упругих тензометров в исследовании процесса резания, является стабильность их показаний, т. е. условие постоянства их характеристики при длительной переменной нагрузке.

Для испытания на стабильность показаний упругий тензометр устанавливался в приспособлении, изображенном на фиг. 2, на стол горизонтально-фрезерного станка.

На конец зажима 1 надевалась дополнительно спиральная пружина, сжимаемая гайкой, которая обеспечивала предварительный натяг пружины. Подвижному концу тензометра давалось периодическое перемещение порядка 0,1 мм посредством вращающегося эксцентрика, насаженного на шпиндель станка. При испытании тензометру было сообщено 520000 перемещений, после чего было проведено новое исследование его чувствительности, которая точно совпала с начальной.

При создании регистратора, измеряющего величину силы через упругие перемещения какого-либо элемента, возникающие под действием измеряемой силы, следует обращать внимание на предел изменения измерительного усилия регистратора в рабочей зоне. Если это изменение велико, то оно, создавая дополнительную жесткость упругой системе, может существенно снизить показания регистратора.

Характеристикой регистратора с этой точки зрения является отношение предельного приращения измерительного усилия регистратора к максимальной величине измеряемого усилия

$$b = \frac{Q}{P_{max}}$$

Чем больше это отношение, тем меньшую долю составит действительное показание регистратора от того, которое было бы получено в случае отсутствия прироста измерительного усилия.

Если обозначить:

l_d — действительное показание регистратора при нагрузке P_{max} ;

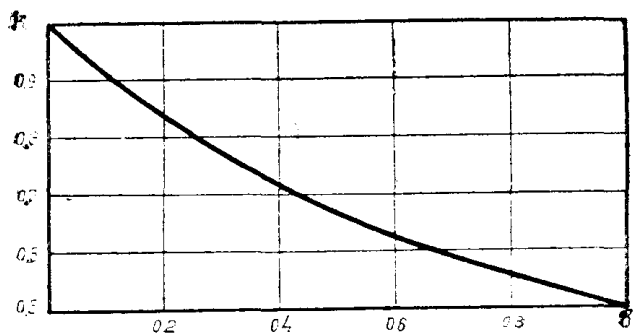
l_0 — показание регистратора при P_{max} в случае, когда $Q = 0$,

то, принимая во внимание прямолинейность характеристик упругого элемента и тензометра, можно записать:

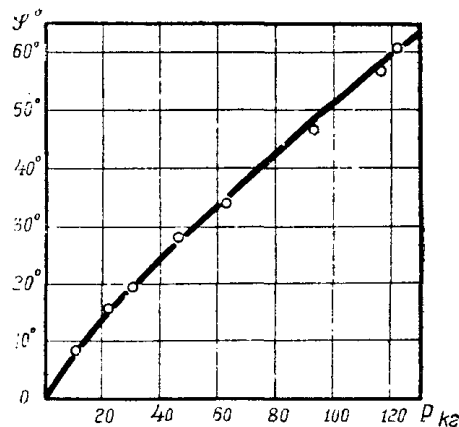
$$k = \frac{l_d}{l_0} = \frac{P_{max}}{P_{max} + Q} = \frac{1}{1 + b}$$

На фиг. 6 данная зависимость представлена графически.

График, приведенный на фиг. 7, изображает результаты силового испытания тензометра, состоящего из 4 пружин сечением $0,2 \times 2,15$ мм каждая. Из графика следует, что при осевом удлинении тензометра на 0,1 мм (при повороте стрелки на угол $\varphi_{0,1} = 18^\circ 30'$) из-



Фиг. 6



Фиг. 7

мерительное усилие возрастает на 42 кг. Если данным тензомером будет измеряться сила, максимальное значение которой $P_{max} = 500-1000$ кг, то

$$b = \frac{Q}{P_{max}} = \frac{42}{(500 \div 1000)} = 0,084 \div 0,042,$$

что соответствует величине $k=0,93-0,96$. Таким образом, прирост измерительного усилия в рабочей зоне определит уменьшение показания регистратора всего на 7—4%, что вполне допустимо, так как и в этом случае передаточное отношение динамометра останется достаточно большим.

Упругие тензометры были установлены для измерения крутящего момента и силы подачи в работе А. И. Промптова [2].

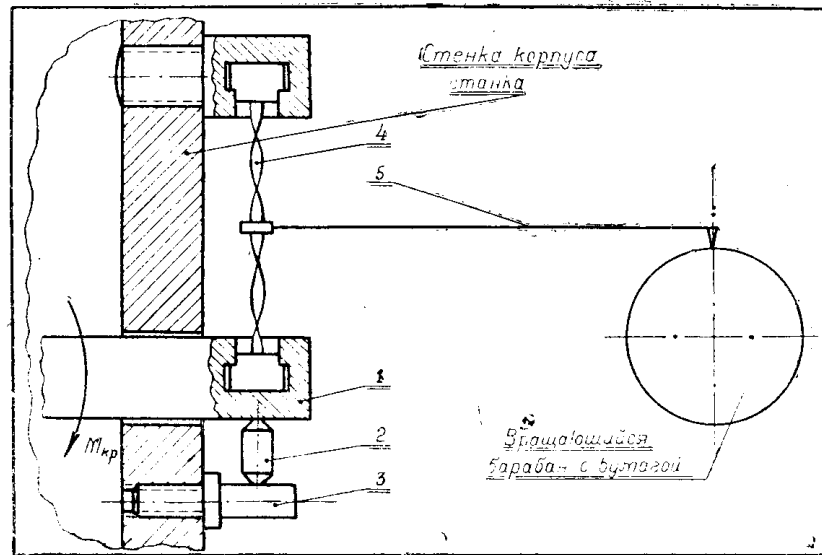
Регистрация крутящего момента в этом исследовании производилась при помощи динамометра системы А. М. Розенберга [3], в котором гидравлическая часть была заменена упругим тензомером (фиг. 8).

Лебедок 1, находящийся под действием крутящего момента, через рыбку 2 давит на консоль 3, упругий прогиб которой определяет величину осевого удлинения пружины 4 и соответствующий характеристике упругого тензометра поворот записывающей стрелки 5.

Зарегистрированная таким образом средняя окружная сила резания при фрезеровании автором [2] сравнивалась с соответствующими силами резания, зарегистрированными Л. А. Хворостухиным при помощи гидравлического динамометра при токарной обработке [4].

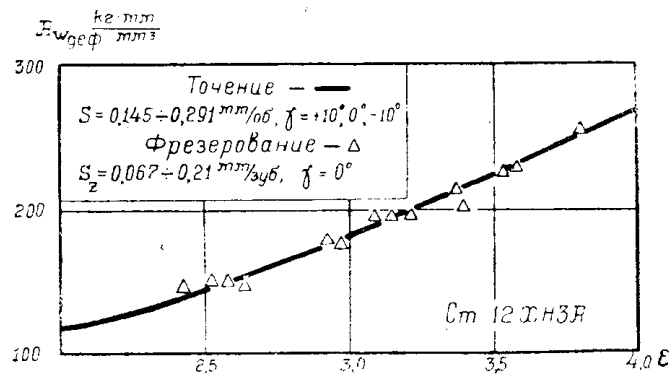
На фиг. 9 представлена экспериментальная зависимость удельной работы деформации стружки от относительного сдвига, полученная Л. А. Хво-

ростухиным с наложенными на нее экспериментальными точками Промптова. Совпадение точек на графике с кривой, построенной по данным, полученным при помощи гидравлического динамометра, подтверждает пригод-



Фиг. 8

ность упругого тензомера для регистрации сил, действующих на режущий инструмент в процессе снятия стружки.



Фиг. 9

Выводы

1. Предлагаемый упругий тензомер позволяет осуществить запись малых упругих перемещений с увеличением приблизительно в 500 раз без каких бы то ни было рычажных и т. п. передач, а, следовательно, без всяких потерь на трение (не считая трения стрелки о бумагу).

2. Упругий тензомер имеет прямолинейную характеристику, чрезвычайно удобную при эксплуатации.

3. Упругий тензомер может быть использован не только для измерения перемещений, но и как измеритель сил (смотри график силовых испытаний на фиг. 7).

4. Упругий тензомер не может быть использован для регистрации

быстро изменяющихся процессов, так как обладает определенной инерционностью.

5. Чувствительность упругого тензометра можно значительно повысить, если механическую запись заменить оптической (при этом сечение пружин тензометра может быть значительно уменьшено).

ЛИТЕРАТУРА

1. Апарин Г. А. и Городецкий И. Е. — Допуски и технические измерения, Машгиз, 1953.

2. Промптов А. И. — Динамика скоростного фрезерования сталей торцевыми фрезами. Автореферат, Томск, 1954.

3. Розенберг А. М. — Динамика фрезерования, Изд. „Советская наука“, 1945.

4. Хворостухин Л. А. — Расчет сил при скоростном резании на основе физико-механических характеристик металлов. Автореферат, Томск, 1954.
