

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-  
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

М. Ф. ПОЛЕТИКА, М. Х. УТЕШЕВ

(Представлено профессором доктором А. М. Розенбергом)

Одной из труднейших задач теории резания металлов является задача о распределении напряжений в зоне резания. Это объясняется, с одной стороны, сложностью деформированного состояния в процессе резания, а с другой стороны, тем, что в зоне сдвига и в контактном слое стружки деформация достигает чрезвычайно высокой степени.

При попытках решения этой задачи аналитическим путем методами математической теории пластичности возникают большие трудности, так как для глубоких пластических деформаций эта теория разработана еще недостаточно. Поэтому естественно было попробовать решить эту задачу экспериментально, для чего наиболее подходящим и, пожалуй, единственным более или менее точным способом нужно считать поляризационно-оптический метод.

С этой целью в лаборатории резания металлов ТПИ была разработана и изготовлена поляризационно-оптическая установка, изображенная на рис. 1. Установка монтируется на токарном станке модели 1К62. Она состоит из оптической системы для наблюдения и фотографирования процесса резания в поляризованном свете и динамометра для измерения силы резания.

В качестве источника света использовалась ртутно-кварцевая лампа ДРШ-250. Для получения монохроматического света применяли либо зеленый светофильтр ЖЗС-9, либо водный раствор сернокислого никеля. Круговая поляризация света обеспечивалась с помощью слюдяных пластинок.

Поляроиды диаметром в 45 мм были закреплены в специальных втулках, которые могли поворачиваться на любой угол, отсчитываемый по лимбу, что позволило определять направления главных напряжений при скрещенных поляризаторах. Фотографирование производилось с помощью фотокамеры 9×12.

Для измерения сил резания был изготовлен высокочувствительный упругоэлектрический двухкомпонентный динамометр, оснащенный тензодатчиками. Применение в этом приборе фольговых датчиков вместо проволочных дало возможность обойтись без усилителя, включая в измерительные диагонали мостов непосредственно вибраторы осциллографа. В качестве осциллографа был использован прибор ОТ-24-51 с вибратором ГЭМЗ-53 тип II. Роль исследуемого объекта выполнял

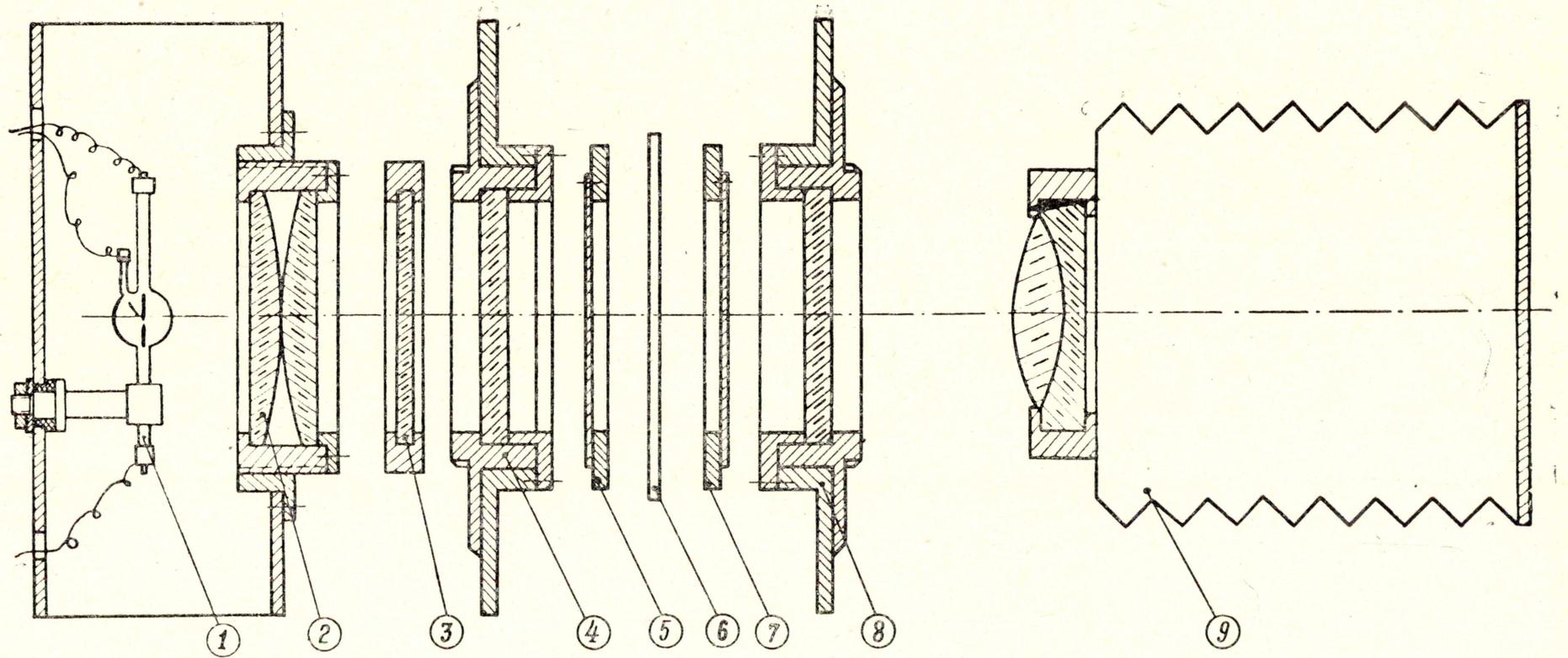


Рис. 1. Оптическая система установки.

либо прозрачный резец, изготовленный из оптически активного материала (при исследовании напряжений в резце), либо прозрачный диск (при исследовании напряжений в обрабатываемой детали).

Опыты проводились в условиях свободного прямоугольного резания с поперечной подачей как при относительно высокой скорости, так и при микроскоростях, для чего станок получал движение от специального редуктора.

При исследовании напряженного состояния в резце последний изготовлялся из прозрачного оптически-чувствительного материала. Геометрические параметры резца: передний угол— $10^\circ$ , задний угол— $15^\circ$ .

Обрабатываемым материалом являлся свинцовый диск диаметром 187 мм и шириной 3 мм. Диск обрабатывался с поперечной подачей  $S = 0,475$  мм/об и скоростью резания  $v = 1,6$  мм/мин. Каждый опыт по оптическому определению напряжений повторялся дважды: первый раз с резцом из оптически малочувствительного материала (плексигласа) и при плоской поляризации света для снятия изоклин, второй раз — с резцом из оптически активной пластмассы (на основе эпоксидной смолы ЭД-6) при круговой поляризации света для снятия картины полос.

Предварительно было установлено, что изменение материала резца (с сохранением, разумеется, геометрических его параметров) не влияет сколько-нибудь существенно на процесс резания.

В нашем случае свободного резания при достаточно большой величине отношения  $b/a$  ширины среза к его толщине можно принять, что зона резания находится в плоском напряженном состоянии. Напряжения  $\sigma_N$  и  $\tau_F$  в некоторой точке на поверхности контакта стружки с резцом, которые в соответствии с общепринятой терминологией удобнее обозначать через  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ , будут при этом выражаться формулами

$$\tau_{xy} = \tau_F = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha,$$

$$\sigma_y = \sigma_N = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha,$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — главные напряжения в рассматриваемой точке ( $\sigma_1 > \sigma_2$ );  $\alpha$  — угол наклона расчетной площади к главной.

Методом полос была экспериментально определена разность главных напряжений, а по картине изоклин — направления главных напряжений. Методика вычисления напряжений подробно описана в работе [3]. Полученные результаты представлены графиками на рис. 2 и 3. На первом из них приводятся значения разности главных напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) и угла наклона главного напряжения в разных точках по длине контакта, а на втором дается распределение нормальных и касательных напряжений на передней грани. Здесь же приведена кривая изменения коэффициента трения.

Характер полученных нами кривых распределения напряжений такой же, каким он получался в ранее проведенных исследованиях (в том числе и иными методами), и потому не вызывает сомнений. В связи с этим необходимо подчеркнуть некоторые весьма важные следствия, вытекающие из анализа рис. 3:

1) нормальное напряжение непрерывно уменьшается по мере отдаления от режущей кромки резца, причем закон его изменения существенно отличается от треугольника;

2) касательное напряжение на некотором участке, примыкающем к режущей кромке, остается примерно постоянным, что подтверждает факт существования зоны пластического контакта между стружкой и резцом;

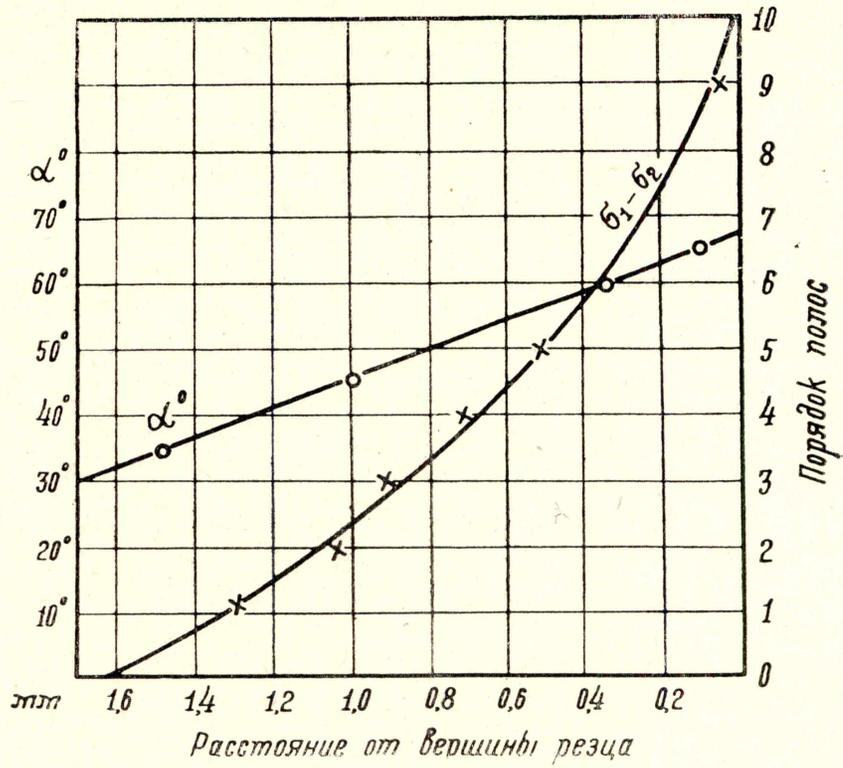


Рис. 2.

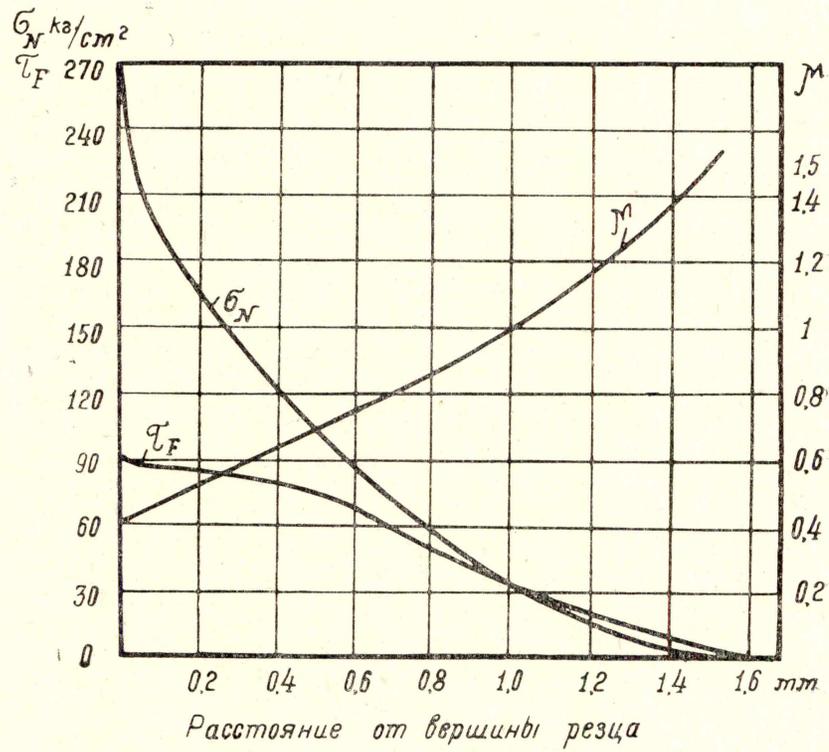


Рис. 3. Распределение нормальных и касательных напряжений на передней грани резца.

3) коэффициент трения переменен по длине контакта, в том числе и на ее упругом участке. Это последнее обстоятельство лишний раз указывает на то, что коэффициент трения при резании металлов не является самостоятельной физической характеристикой.

Для количественной оценки точности полученных результатов мы, обработав показания динамометра, определили силы на передней и задней гранях резца и рассчитали средние напряжения на поверхности контакта стружки с резцом.

В табл. 1 эти величины приводятся в сопоставлении с подсчитанными по данным оптического метода (путем графического интегрирования эпюр нормальных и касательных напряжений) для скорости резания  $v = 1,6$  мм/мин.

Таблица 1

Средние напряжения на поверхности контакта	$\tau_F$	$\sigma_N$
	кг/см <sup>2</sup>	кг/см <sup>2</sup>
Полученные оптическим методом	50	76
По показаниям динамометра	51	80

Нетрудно убедиться, что совпадение результатов очень хорошее, что говорит о высокой точности фотоупругого метода в применении к исследованию напряженного состояния резца.

Об этом же не менее убедительно свидетельствует сопоставление углов действия  $\omega$ , найденных разными способами. По показаниям динамометра

$$\omega_{\partial} = \operatorname{arctg} \frac{P_y}{P_z} = 20^{\circ} 30'.$$

Тот же угол, подсчитанный графоаналитическим способом на основе анализа оптической картины напряженного состояния в головке резца, оказался равным

$$\omega_0 = 20^{\circ} 50'.$$

Для исследования напряжений в обрабатываемом материале перед резцом были приготовлены прозрачные диски из целлулоида. Целлулоид был выбран потому, что он имитирует пластичные металлы по своим механическим свойствам, дает при резании сливную стружку и, что очень существенно, сохраняет достаточную прозрачность и упруго-оптические свойства при малых пластических деформациях. Механические характеристики использованного нами целлулоида:  $\sigma_B = 483$  кг/см<sup>2</sup>,  $\delta = 30\%$ ,  $E = 2 \cdot 10^4$  кг/см<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

На рис. 4 приведена картина изохроматических полос и изоклин, полученная при скорости резания в 0,8 м/мин и подаче в 0,475 мм/об. Из этой картины видно, что упругая область под резцом делится нейтральной (нулевой) линией на две зоны: зону сжимающих напряжений перед резцом и зону растягивающих напряжений позади резца. Все изохроматические полосы выходят из вершины резца, которая является, таким образом, точкой, концентрации напряжений.

На линии АВ упругие деформации переходят в пластические, то есть напряжения вдоль этой линии, которую можно назвать граничной, достигают предела текучести материала. Так как эта линия соответствует полосе одного порядка, то все лежащие на ней точки имеют постоянную разность главных напряжений

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \text{const на } \overline{AB}, \quad (1)$$

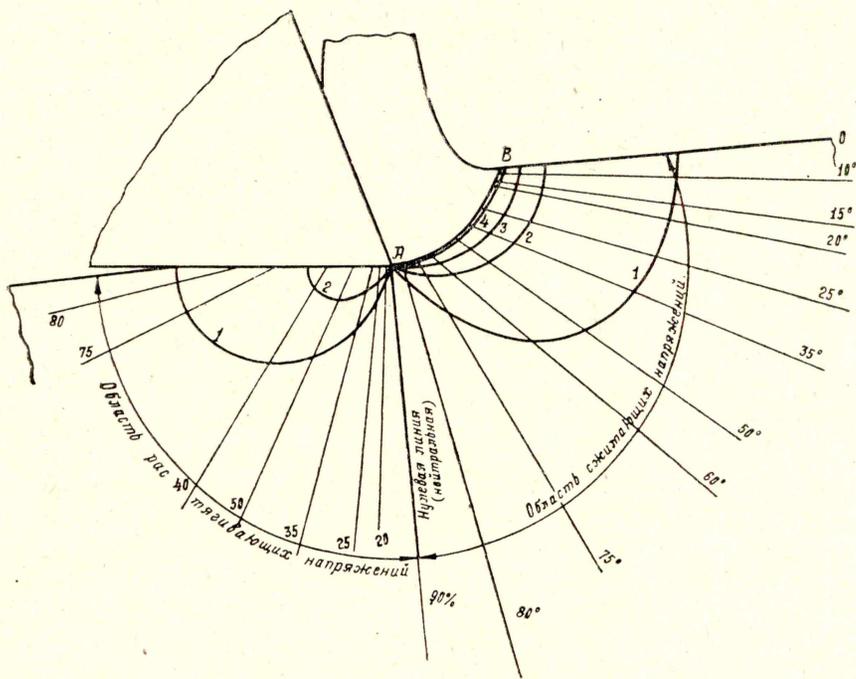


Рис. 4.

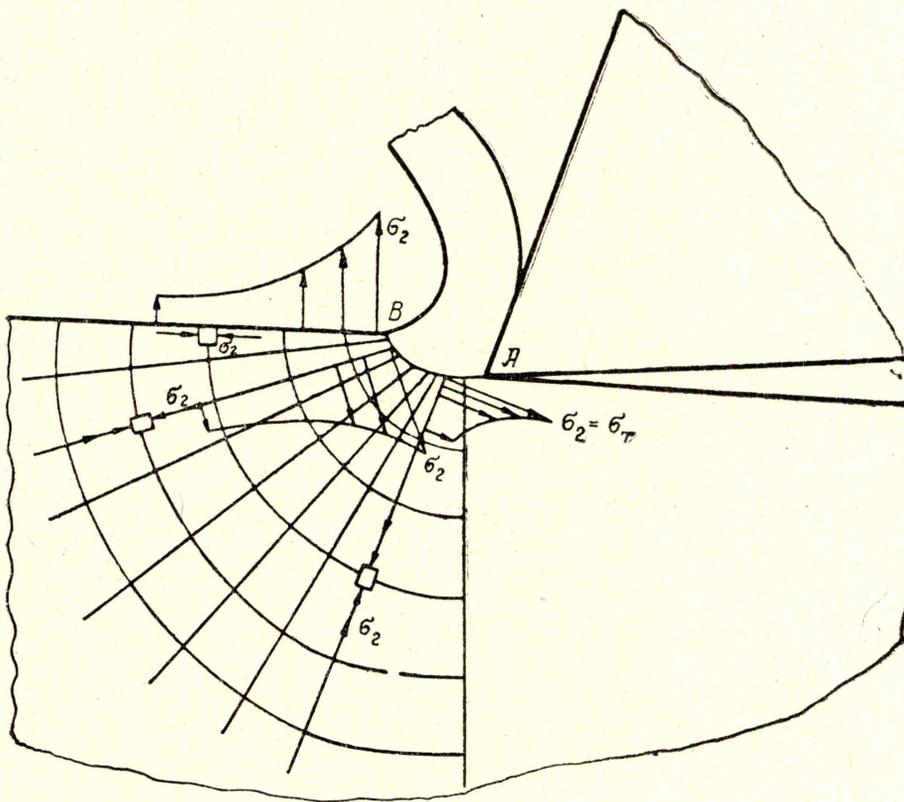


Рис. 5.

что является выражением условия пластичности Треска-Сен-Венана

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2K = 2\tau_{\max}. \quad (2)$$

Обращаясь к рис. 5, на котором показаны траектории главных напряжений, замечаем, что эти линии практически можно считать прямыми. Это означает, что в нашем случае второе главное напряжение несущественно мало и можно принять его равным нулю. Тогда из (2) будем иметь

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2}$$

и

$$\tau_{\max} = \tau_T = K = \frac{\sigma_T}{2} \text{ на } AB,$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести исходного (ненаклепанного) материала.

Значения напряжения  $\sigma_1$ , подсчитанного для точек, расположенных на линии  $AB$ , довольно хорошо совпадают с величиной предела текучести целлулоида при испытании на растяжение, что подтверждает вышеизложенные соображения. Что касается формы и положения самой линии  $AB$ , то важно отметить, что она во всех исследованных нами случаях является кривой с выпуклостью, обращенной книзу. С увеличением скорости резания объем зоны пластической деформации сокращается и линия  $AB$  смещается вправо. Это иллюстрируется рис. 6, на котором показаны положения граничной линии при различных скоростях резания.

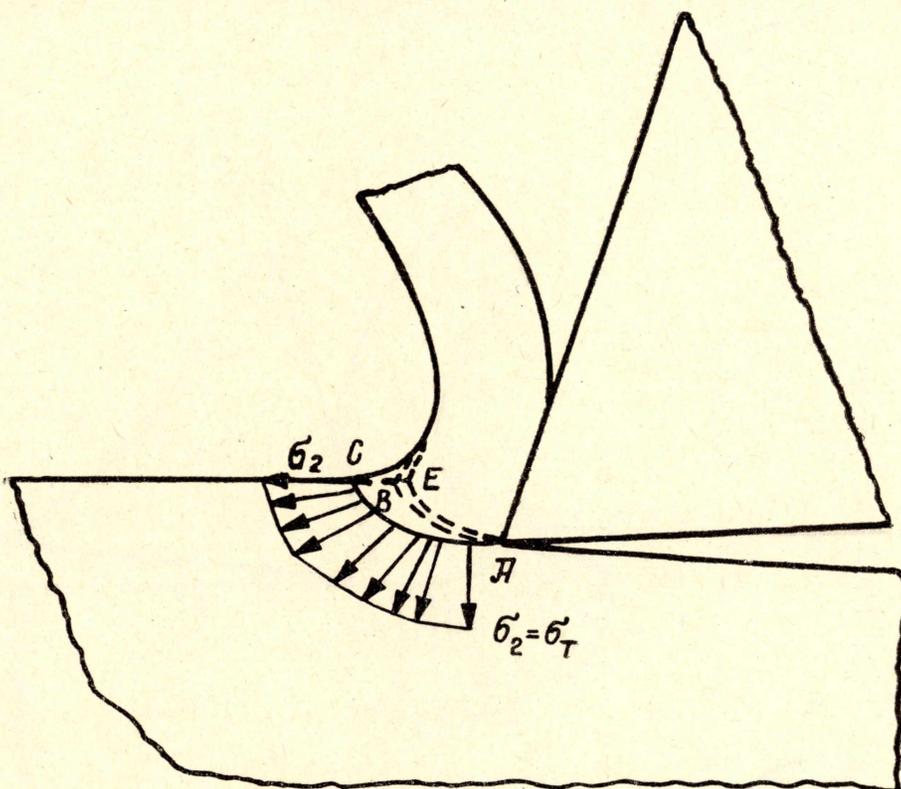


Рис. 6.

Помимо траекторий главных напряжений (рис. 5), нами были рассчитаны и построены графически траектории максимальных касательных напряжений (рис. 7). На обеих приводимых схемах нанесены экспериментально полученные эпюры распределения напряжений вдоль их траекторий. Нетрудно видеть, что как касательные, так и нормальные

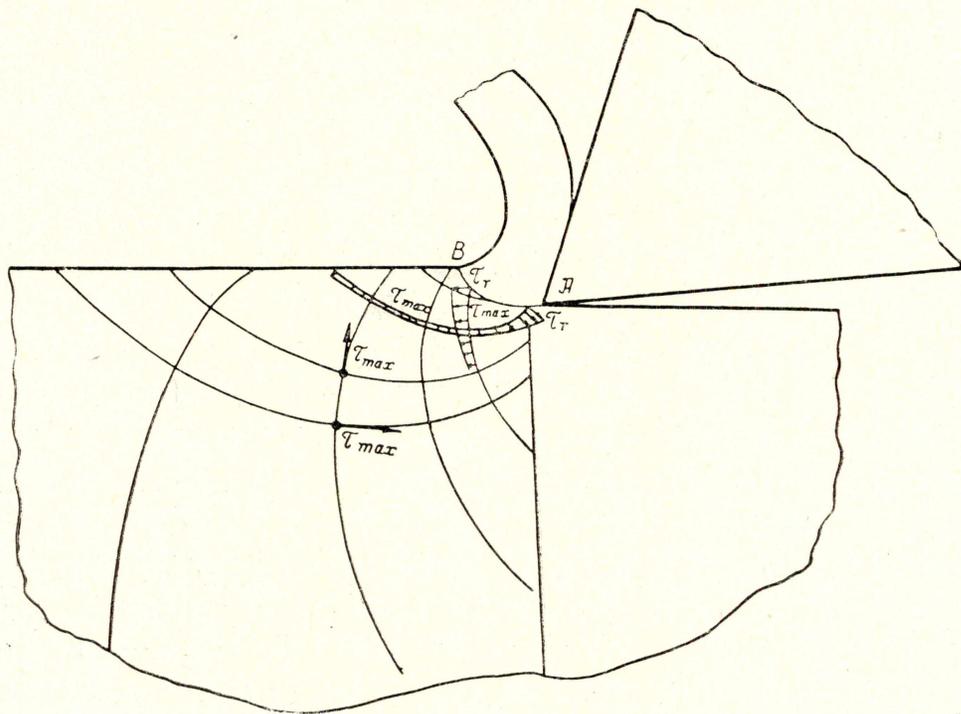


Рис. 7.

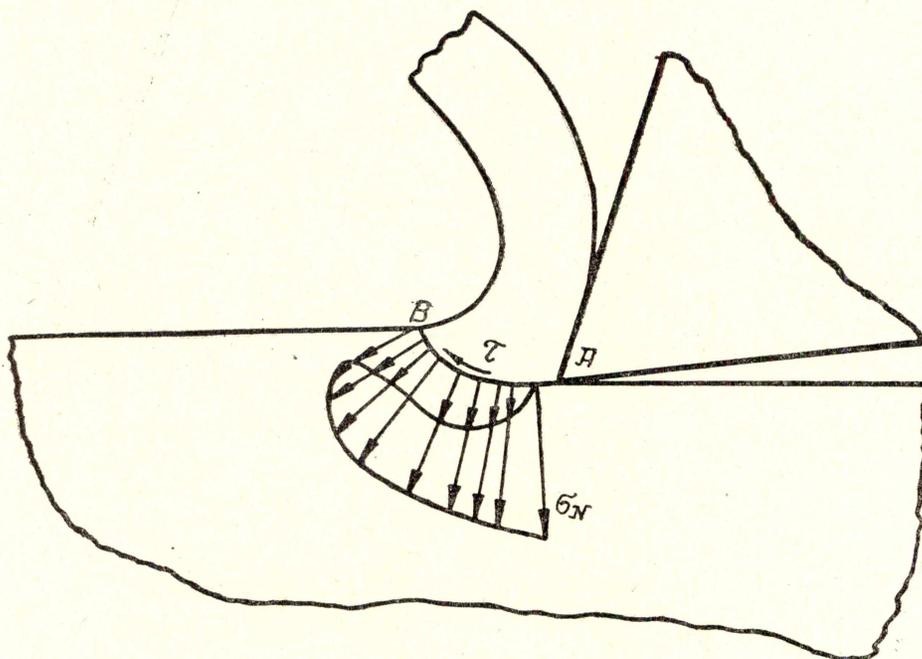


Рис. 8.

напряжения по мере отдаления от граничной линии  $AB$  непрерывно уменьшаются: сначала очень резко, затем значительно слабее.

Из рис. 7, кроме того, следует, что линия  $AB$ , разграничивающая упруго-напряженную и пластическую области, не совпадает с траекторией максимальных касательных напряжений и поэтому не является линией скольжения (характеристикой), как склоны считают некоторые исследователи. Это означает, что максимальное касательное напряжение в любой точке, расположенной на самой линии  $AB$ , не совпадает по направлению с касательной к  $AB$  в этой точке.

Угол между траекторией максимального касательного напряжения и граничной линией непрерывно уменьшается по направлению от вершины резца к точке  $B$ , лежащей на свободной поверхности. Поскольку же, как это выше было установлено, величина максимального касательного напряжения постоянна во всех точках линии  $AB$ , то касательные напряжения, действующие вдоль  $AB$ , и нормальные, действующие ей перпендикулярно, должны также непрерывно меняться. Сказанное иллюстрируется рис. 8, на котором даны эпюры касательных и нормальных напряжений на линии  $AB$  и указано их направление в каждой точке. Мы убеждаемся, что по направлению от точки  $A$  к точке  $B$  нормальные напряжения непрерывно уменьшаются, а касательные — возрастают.

Изложенные выше результаты исследования процесса резания поляризационно-оптическим методом позволяют сделать следующие выводы:

1. Упруго-оптический метод исследования напряжений в приложении к процессу резания металлов дает точные количественные результаты.

2. Упруго-оптический метод показывает, что существуют две зоны напряжений: зона сжимающих напряжений впереди резца и зона растягивающих напряжений сзади резца.

3. Граничная линия, где упругие деформации переходят в пластические, является криволинейной, а напряжения на ней достигают предела текучести ненаклепанного материала. Эта линия не является траекторией максимальных касательных напряжений, а поэтому ее нельзя назвать линией скольжения или характеристикой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Г. С. Исследование напряжений в рабочей части резца на поляризационно-оптической установке с применением кино съемки. Вестник машиностроения, № 5, 1958.

2. Камсков Л. Ф. О внешнем трении при резании пластичных металлов. Вестник машиностроения, № 5, 1959.

3. Новые исследования в области резания металлов. Под ред. проф. докт. Розенберга А. М. Машгиз. В печати.

4. Розенберг А. М., Еремин А. Н. Элементы теории процесса резания металлов. Машгиз, 1956.

5. Фрохт М. М. Фотоупругость, т. I—II, 1948—1950.