

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В КОНСТРУКЦИИ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ МЕТОДОМ ФОТОМЕХАНИКИ

**А.Н. Попиков, В.А. Рогов**

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Российский университет дружбы народов  
*Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117187*

На поляризационно-оптических моделях изучается напряженно-деформированное состояние узла крепления режущей пластины. Моделируются поля напряжений в зависимости от материала и геометрии опорной пластины, возникающие при резании в области контакта режущей пластины с опорной и опорной пластины с корпусом резаца.

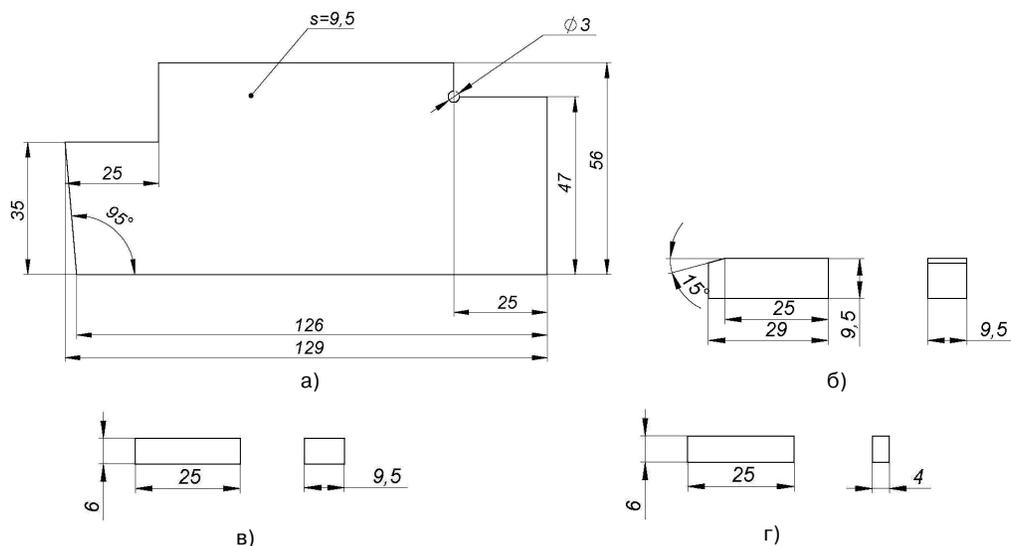
**Ключевые слова:** резец, режущая пластина, напряжения, деформации, фотомеханика.

Применение композиционных материалов в опорных пластинах токарных резцов позволяет создавать конструкции, улучшающие их динамические качества. На стадии проектирования таких конструкций необходимо определить геометрические параметры несущего каркаса опорной пластины, изготавливаемой из стали и наполнителя (композита), механические характеристики которых отличаются от стандартной опорной пластины и обеспечивают демпфирующие свойства конструкции. Соотношение геометрических параметров между каркасом и наполнителем придает конструкции определенные динамические качества. Эти геометрические параметры желательно знать на стадии проектирования опорных пластин. Для решения этой задачи предлагается применить метод фотомеханики — поляризационно-оптический метод исследования напряжений на прозрачных моделях конструкции узла крепления режущей пластины, по напряженно-деформированному состоянию (НДС) моделей оценить демпфирующие свойства конструкции. Кроме того, экспериментальные данные сравнивались с расчетными данными, полученными компьютерным комплексом CosmosWorks.

Метод фотомеханики основан на свойстве прозрачных материалов приобретать оптическую анизотропию при механическом деформировании. Степень анизотропии зависит от напряженно-деформированного состояния. Количественную связь между оптическим эффектом и разностью главных напряжений выявляют с помощью полярископов. Исследование методом фотомеханики проводилось на поляризационной установке ППУ-7.

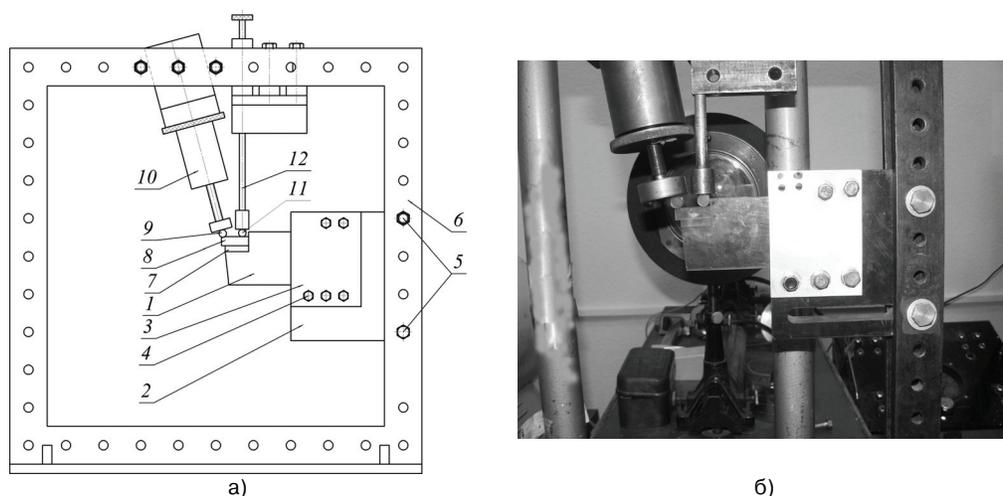
Модели опорной и режущей пластины резаца, представляющие собой брус прямоугольного сечения (рис. 1 б, 1 в) выполнялись в масштабе 2 : 1 из оптически чувствительного материала на основе смолы ЭДб, отвержденной метилтетрагидрофталевым ангидридом с оптической постоянной  $\sigma_0^{1,0} = 1,88$  МПа (18,8 кг/см<sup>2</sup>). Опорная пластина (рис. 1 в) изготовлена из полиметилметакрилата Э-2 с оптической постоянной  $\sigma_0^{1,0} = 1,37$  МПа (13,7 кг/см<sup>2</sup>). Геометрические параметры пластин указаны на рис. 1.

Модель корпуса резца и тарировочного диска  $\varnothing 10$  мм также изготовлены из материала ЭД6МТГФА,  $\sigma_0^{1,0} = 1,88$  МПа ( $18,8$  кг/см<sup>2</sup>) (рис. 1 а).



**Рис. 1.** Геометрические параметры исследуемых моделей:  
 а — модель корпуса резца, б — модель режущей пластины,  
 в, г — модель опорных пластин

Для проведения эксперимента был разработан и изготовлен стенд (рис. 2). Модель корпуса резца 1 устанавливалась в корпус приспособления 2 и прижималась пластиной 3 с помощью болтов 4. Корпус приспособления крепился двумя болтами 5 к раме 6. Затем устанавливалась опорная 7 и режущая пластина 8. Усилие зажима (динамометр 11) и прикладываемую силу резания (динамометр 9) создавали с помощью нагружающих винтов 12 и 10 (рис. 2 а).



**Рис. 2.** Схема нагружающего устройства (а) и фотография общего вида установки в рабочем поле полярископа (б)

Модель конструкции узла крепления режущей пластины представляла собой составную каркасную систему, в которой нижний (резцедержка) и верхний элементы (режущая пластина) отличались от среднего элемента (опорной пластины) по геометрическим параметрам и упругим характеристикам.

Известно, что в соответствии с общей теорией подобия для двухкомпонентного тела при действии сосредоточенных сил без учета собственного веса критериальное уравнение для составного тела принимает вид

$$F\left(\frac{P}{E_{\Pi} \cdot L^2}; \frac{E_K}{E_{\Pi}}; \nu_K; \nu_{\Pi}; \frac{L_K}{L_{\Pi}}\right) = 0, \quad (1)$$

где  $P$  — внешнее усилие;  $E_{\Pi}$  — модуль упругости перемычки;  $E_K$  — модуль упругости каркаса;  $L$  — сходный геометрический параметр, — соответственно коэффициенты Пуассона каркаса и перемычки.

Эти критерии подобия должны быть однозначны для модели и природы.

В соответствии с критериальной формой следует, что

$$\left(\frac{E_K}{E_{\Pi}}\right)_{\text{нат}} = \left(\frac{E_K}{E_{\Pi}}\right)_{\text{мод}}, \quad (2)$$

$$(\nu_K)_{\text{нат}} = (\nu_K)_{\text{мод}}; (\nu_{\Pi})_{\text{нат}} = (\nu_{\Pi})_{\text{мод}}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{L_K}{L_{\Pi}}\right)_{\text{нат}} = \left(\frac{L_K}{L_{\Pi}}\right)_{\text{мод}}. \quad (4)$$

Следовательно, и  $K_{\Pi} = 1$ , где

$$K_{\Pi} = \frac{n_{\text{нат}}}{n_{\text{мод}}} = \frac{(E_K / E_{\Pi})_{\text{нат}}}{(E_K / E_{\Pi})_{\text{мод}}}. \quad (5)$$

Из полученных критериев следует, что при моделировании с учетом  $E_{\text{нат}} \neq E_{\text{мод}}$

$$\sigma_{\text{нат}} = \frac{\kappa_p}{K_L^2} \cdot \sigma_{\text{мод}}, \quad (6)$$

где  $\kappa_p$  — коэффициент силового подобия,  $K_L$  — коэффициент геометрического подобия,  $\sigma_{\text{нат}}$  и  $\sigma_{\text{мод}}$  — соответственно нормальные напряжения в натуре и модели.

Таким образом, что геометрическом и силовом подобии, а также при равенстве коэффициентов Пуассона в модели и натуре и равенстве соотношений модулей упругости режущей и опорной пластины поле напряжений модели будет аналогичным полю напряжений природы, что позволяет по результатам эксперимента оценивать напряженное состояние реальной составной конструкции и прогнозировать поведение комбинированной конструкции узла крепления режущей пластины.

Для возможности прогнозирования поведения составного элемента при колебательном процессе воспользуемся энергетической концепцией, основанной на накоплении энергии деформации в различных по податливости элементах конструкции.

Можно предположить, что с увеличением податливости количество энергии деформации уменьшается, что способствует большим потерям на внутреннее трение при гистерезисе, предопределяющем, в свою очередь, процесс затухания колебаний при деформации.

Для определения накопленной энергии деформаций воспользуемся зависимостью для определения потенциальной энергии упругой деформации через тензор напряжений. Известно, что полная удельная потенциальная энергия деформаций включает компоненты, связанные с изменением объема и изменением формы.

$$U_0 = U_V + U_\phi = \frac{1}{2 \cdot E} \left[ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2 \cdot \nu (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_1 \cdot \sigma_3) \right], \quad (7)$$

где  $E$  — модуль упругости материала;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  — компоненты главных нормальных напряжений при объемном напряженном состоянии.

Установлено, что наибольшая часть энергии деформаций связана с изменением формы нагруженной конструкции. Эта часть энергии вычисляется по соотношению

$$U_\phi = \frac{1 + \nu}{3 \cdot E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_3). \quad (8)$$

После преобразований и при условии плоского напряженного состояния (в методе фотомеханики), т.е.  $\sigma_3 = 0$ , будем иметь:

$$U_\phi = \frac{1 + \nu}{3 \cdot E} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right]. \quad (9)$$

В методе фотомеханики информация о напряжениях представляется в виде изолиний равных величин разности главных напряжений, т.е.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max}. \quad (10)$$

В то же время произведение  $\sigma_1 \cdot \sigma_2$  достаточно мало, так как  $\sigma_2 \ll \sigma_1$ , и при расчете эта величина может учитываться поправочным коэффициентом (с определенной погрешностью).

Таким образом, выражение для потенциальной удельной энергии деформирования можно представить в виде

$$U_0 = K \cdot U_\phi = \frac{1 + \nu}{3 \cdot E} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 \cdot 1,1. \quad (11)$$

Здесь коэффициент  $K = 1,1$  учитывает часть энергии изменения объема и составляющих  $(\sigma_1 \cdot \sigma_2)$ .

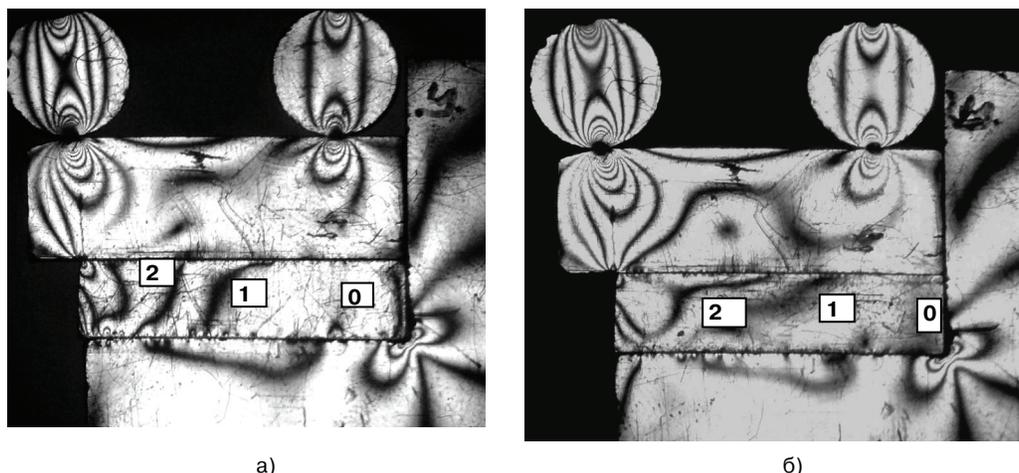
Следовательно, используя данные физического эксперимента, можно несложным расчетом определить удельную энергию деформации и в предположении плоского напряженного состояния вычислить полную потенциальную энергию деформации в любой зоне нагруженной модели. Для этого удобнее всего использовать зависимость

$$\Pi_0 = U_\phi \cdot K \cdot V, \quad (12)$$

где  $V = x \cdot y \cdot t$  — объем, в котором усредняется величина энергии с вычисленным средним напряжением  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ .

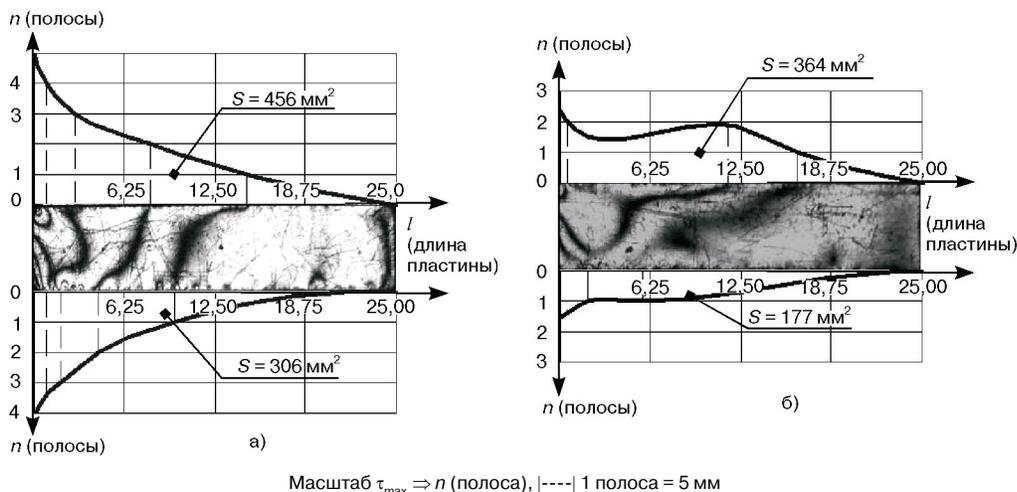
Используя эти данные, можно получить приближенно полную энергию деформации по любому сечению или по любой площади исследуемой модели.

В ходе эксперимента последовательно нагружалась режущая пластина и снималась нагрузка с нее. Получены фотограммы напряженно-деформированного состояния опорной пластины в зависимости от ее конструкции (рис. 4).



а) б)  
**Рис. 4.** Фотограммы, иллюстрирующие изменение максимальных касательных напряжений в зависимости от конструкции опорной пластины:  
 а) узкая опорная пластина; б) широкая опорная пластина

На представленных фотограммах видно, что в зависимости от геометрии и свойств материала максимальные касательные напряжения ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) возникающие на границах опорной пластины изменяются. На рис. 4 видно, что уровень напряжений в узкой пластине значительно выше, чем в широкой. На основании полученных фотограмм были построены эпюры максимальных касательных напряжений и определены их площади (рис. 5).

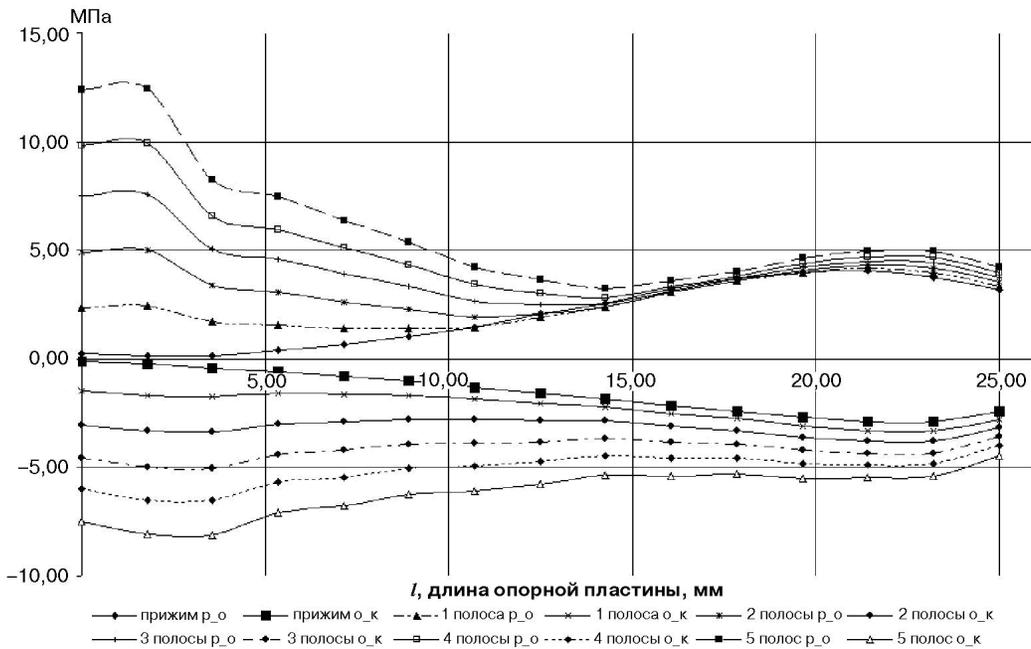


Масштаб  $\tau_{\max} \Rightarrow n$  (полоса), |----| 1 полоса = 5 мм  
**Рис. 5.** Эпюры напряжений на границах опорной пластины с режущей пластиной и корпусом резцедержки:  
 а) узкая опорная пластина б) широкая опорная пластина

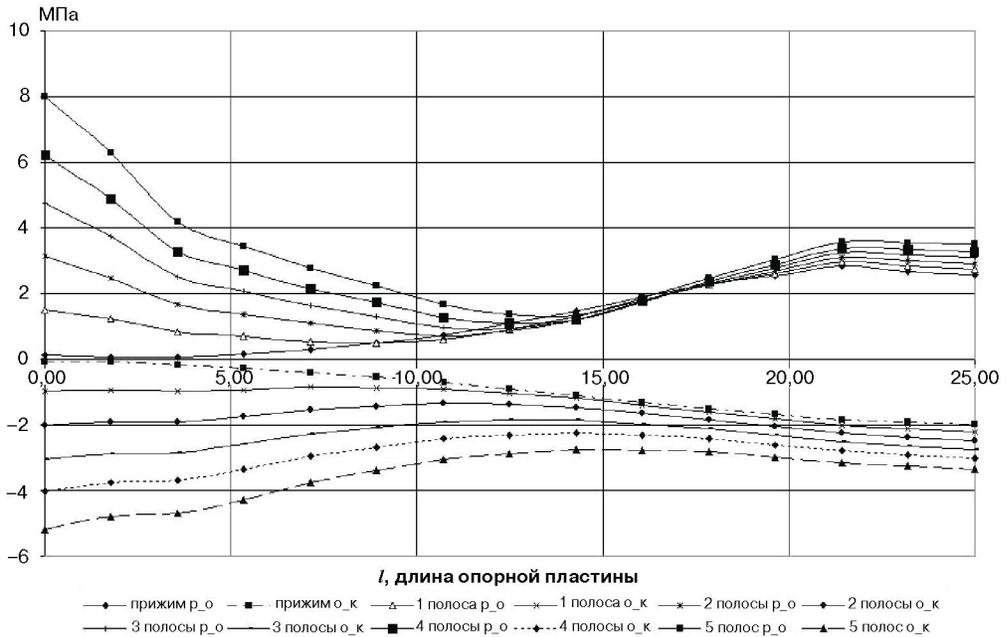
Цена полосы в широкой пластине отличается от узкой, поэтому напрямую сравнивать эпюры нельзя. Следует перевести в напряжения с одинаковым масштабом. Сопоставление площадей эпюр максимальных касательных напряжений позволяет для поставленной задачи составной модели оценить соотношение полной энергии деформации в сечении «режущая пластина — опорная пластина» и «опорная пластина — корпус резца» и прогнозировать тем самым динамические качества узла крепления режущей пластины в зависимости от конструкции и свойств материала опорной пластины.

Для сравнения полученных данных с помощью поляризационно-оптического метода были проведены исследования аналогичной модели и с такими же условиями нагружения, но с помощью программного модуля Cosmos Works — мощного и простого в использовании программного комплекса для проведения инженерных расчетов. Созданный для нужд промышленности Cosmos Works позволяет решать любые инженерные задачи; он имеет широкий спектр специализированных решателей, позволяющих провести анализ большинства встречающихся задач для деталей и сборок.

С помощью этого продукта получали максимальные касательные напряжения в модели, и на основании полученных напряжений и выделенных нами интересующих нас сечений с помощью программного модуля Cosmos Works строили эпюры напряжения для узкой и широкой опорной пластины в местах контакта опорной и режущей пластины а также в местах контакта опорной пластины с корпусом. Полученные результаты представлены на рис. 6 для узкой опорной пластины и на рис. 7 — для широкой опорной пластины.



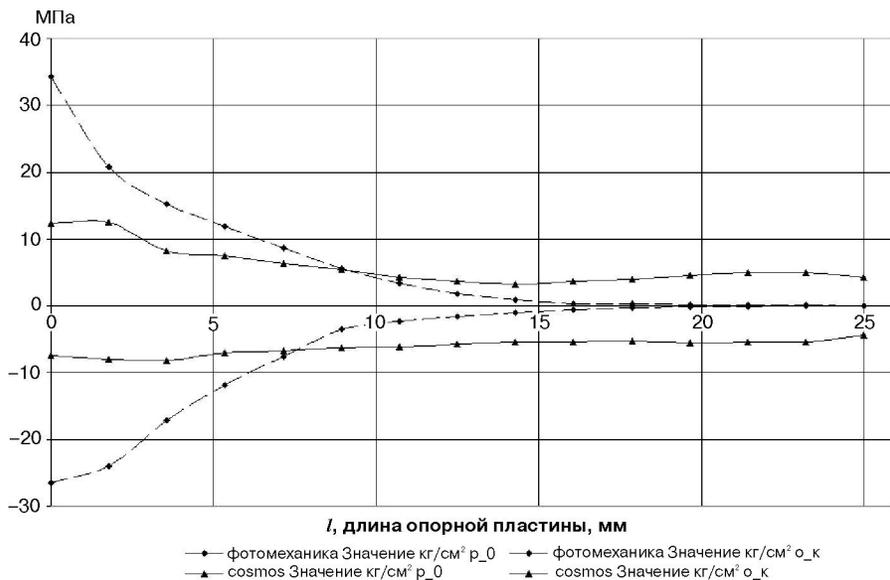
**Рис. 6.** Эпюры максимальных касательных напряжений, возникающие в зонах контакта опорной пластины с режущей и опорной пластины с корпусом резца для узкой опорной пластины



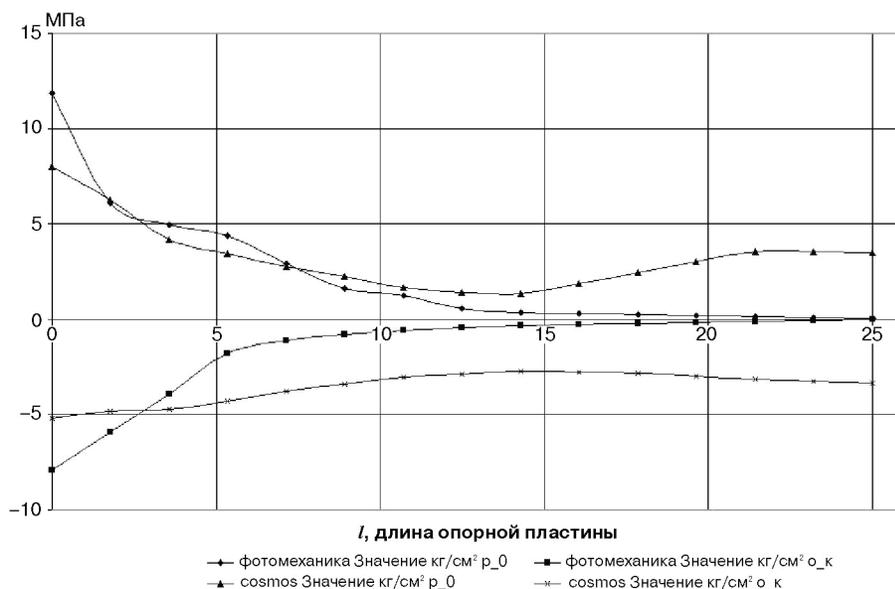
**Рис. 7.** Эпюры максимальных касательных напряжений возникающие в зонах контакта опорной пластины с режущей и опорной пластины с корпусом резца для широкой опорной пластины

На представленных эпюрах видно, что напряжения, возникающие в узкой опорной пластине, значительно выше, чем в широкой.

После получения результатов по фотомеханике и Cosmos Works полученные данные обрабатывались с помощью программы Excel, и все значения приводились к одинаковым размерностям. Получали графики напряжений и сравнили полученные напряжения (рис. 8 и 9).



**Рис. 8.** Сравнение эпюр максимальных касательных напряжений возникающих в зонах контакта опорной пластины с режущей и опорной пластины с корпусом резца полученные с помощью фотомеханики и Cosmos Works для узкой опорной пластины



**Рис. 9.** Сравнение эпюр напряжений возникающих в зонах контакта опорной пластины с режущей и опорной пластины с корпусом резца полученные с помощью фотомеханики и Cosmos Works для широкой опорной пластины

Анализ эпюр показывает, что модель ведет себя одинаково как при исследовании с помощью фотомеханики, так и с помощью Cosmos Works. В обоих случаях с увеличением прикладываемой силы резания изменяется сила прижима. При исследовании модели методом фотомеханики наблюдается уменьшение силы зажима режущей пластины, которая с увеличением силы резания уменьшается, затем с уменьшением восстанавливается, но не полностью. При исследовании модели с помощью Cosmos Works видно, что с увеличением силы резания увеличиваются напряжения в месте зажима режущей пластины. Сравнение эпюр показало, что несовпадение физической модели с компьютерной составляет от 7 до 12%, это объясняется тем, что поляризационно-оптический метод имеет погрешность из-за усреднения количества полос. На основании этого можно сделать вывод: компьютерная модель вполне адекватна и может использоваться для определения величины максимальных касательных напряжений с привлечением небольших средств и затратами времени по сравнению с поляризационно-оптическим методом.

Сопоставление эпюр распределений энергии деформации позволяет для поставленной задачи оценить соотношение полной энергии деформации для режущей и опорной пластины и прогнозировать динамические качества опорной пластины в зависимости от геометрии и свойства материала опорной пластины.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

- [2] Кошеленко А.С., Позняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. — М.: Граница, 2004.
- [3] Rogov В.А. Разработка комбинированных корпусов режущих инструментов из синтетического материала с повышенными демпфирующими свойствами. — М., 1998.

**RESEARCH OF THE IS INTENSE-DEFORMED  
CONDITION IN A DESIGN OF KNOT OF FASTENING  
OF A CUTTING PLATE USING METHOD  
OF PHOTO ELASTICITY**

**A.N. Popikov, V.A. Rogov**

Department of Internal Combustion Engines  
Peoples' Friendship University of Russia

*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

On poljarizatsionno-optical models the is intense-deformed condition of knot of fastening of a cutting plate is studied. Fields of pressure depending on a material and geometry of the basic plate, arising are modelled at cutting in the field of contact of a cutting plate to a basic and basic plate with the cutter case.

**Key words:** a cutter, a cutting plate, pressure, deformations, photomechanics.