

## Расчет машиностроительных конструкций

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТРАВЛЕНИИ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ОБРАЗЦА**

Ю.В. БЕЛОУСОВ, *канд. техн. наук, доцент*  
*Московский государственный технический университет*  
*им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*

*В статье рассмотрен экспериментально-теоретический метод определения технологических остаточных напряжений с применением послойного травления консольно закрепленного образца. Скорректирована методика расчета остаточных напряжений в поверхностных слоях материала.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** остаточные напряжения, прогиб, послойное травление, консольно закрепленный образец.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей создаются в результате обработки. Значительные остаточные напряжения возникают после механической обработки: точения, фрезерования. Их появление связано с силовым и тепловым воздействием инструмента, что приводит к большим силовым и температурным градиентам в зоне обработки. Так, при точении растягивающие остаточные напряжения могут составлять 300...600 МПа при глубине залегания 0,1...0,2 мм, а максимальные температуры в зоне резания – 500...800°C. [1, 6]. Остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей возникают после термической и химико-термической обработки.

При поверхностной закалке токами высокой частоты, цементации, азотировании и цианировании деталей зубчатых передач в их поверхностных слоях создаются сжимающие остаточные напряжения. Если при шлифовании поверхности зубьев после химико-термической обработки не возникают остаточные напряжения (обычно растягивающие), то сопротивление усталости передач возрастает [2].

Остаточные напряжения возникают также в стенках отливок, в элементах сварных соединений [3], при обработке заготовок давлением и т.д.

Величина остаточных напряжений является важным параметром, определяющим качество изделий, влияет на работоспособность и долговечность деталей, что особенно важно при работе в условиях знакопеременных и динамических нагрузок. Поэтому большое значение имеет точность определения остаточных напряжений.

Определению остаточных напряжений посвящено большое число работ. Их анализ показывает, что наряду с неразрушающими методами диагностики, например рентгеновским, широкое применение имеют механические методы, основанные на последовательном стравливании поверхностных слоев с образцов, вырезаемых из детали электроискровым или другим методом.

При послойном снятии тонких слоев материала измеряют прогиб и остаточную толщину образца. Образцы выполняются в виде призматических стержней. Их закрепляют шарнирно по концам или консольно. При этом по ряду причин консольное закрепления образцов оказывается более удобным.

Процесс стравливания материала с рабочей поверхности образца осуществляется с помощью специального устройства, которое может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме [5].

При определении остаточных напряжений в консольно закрепленном образце получают три последовательных ряда экспериментальных данных: толщина образца  $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n$ ; толщина снятых слоев  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_n$ ; приращения прогибов образца  $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n$ .

На заключительном этапе вычисляют остаточные напряжения в каждом элементарном слое, начиная с поверхностного и далее вглубь материала.

При расчете остаточных напряжений используют формулу [5]

$$\sigma_{i_{ост}} = \frac{E}{3l^2} \left[ \frac{h_i^2 f_i}{\delta_i} - \sum_1^i (h_{i-1} f_{i-1}) - 3h_{i-1} \sum_1^i f_{i-1} \right], \quad (1)$$

согласно которой для определения остаточных напряжений в  $i$ -м слое необходимо учитывать напряжения изгиба и растяжения, вызванные снятием всех предыдущих слоев, что весьма неудобно и сильно усложняет расчеты, особенно при ручном режиме работы.

В работе [4] для расчета остаточных напряжений в консольно закрепленном образце получена следующая формула:

$$\sigma_{i_{ост}} = \left[ \arccos \left( \frac{h_i}{h_i - 2f_i} \right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12 \delta_i l^2} - \frac{3 \sigma_{(i-1)_{ост}} \delta_{i-1} (h_{i-1} - f_{i-1})}{h_{i-1}^2}. \quad (2)$$

Там же показано, что расчет напряжений формуле (2) точнее, чем по предыдущей. Он в большей степени соответствует расчету по классической методике (для образца с двумя шарнирно опертыми краями). Кроме того при определении остаточных напряжений в  $i$ -м слое по формуле (2) учитываются только напряжения при снятии предыдущего и данного слоев.

Следует отметить, что второе слагаемое в формуле (2) сильно зависит от толщины снимаемого слоя. При ее уменьшении доля второго слагаемого также уменьшается.

При толщине снимаемого слоя до двадцати микрометров его доля не превышает двух процентов. Поскольку остаточные напряжения значительно изменяются в пределах поверхностных слоев, то для увеличения точности измерений требуется удаление очень тонких слоев. В таком случае остаточные напряжения в удаляемом слое материала можно вычислить непосредственно через параметры только этого слоя, отказавшись от второго слагаемого в формуле (2). Тогда формула для расчета остаточных напряжений примет вид

$$\sigma_{i_{ост}} = \left[ \arccos \left( \frac{h_i}{h_i - 2f_i} \right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12 \delta_i l^2}. \quad (3)$$

Это позволит при обработке экспериментальных данных существенно упростить расчеты поверхностных остаточных напряжений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Белоусов Ю.В. Моделирование силового взаимодействия инструмента при механической обработке резанием// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2016, № 4.– С. 62-66.
2. Белоусов Ю.В. Расчет допускаемых напряжений для оценки контактной прочности цилиндрических передач при пиковой нагрузке// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2015, № 6.– С. 29-32.
3. Белоусов Ю.В. Анализ напряженного состояния кругового прерывистого сварного шва тавровых соединений// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2015, № 3.– С. 54-58.
4. Белоусов Ю.В. Определение остаточных напряжений при травлении консолюльно закрепленного образца// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2016, № 1.– С. 55-60.
5. Олейник Б.Д., Карманов В.В., Винокуров Н.В.. Определение остаточных напряжений с применением устройства с улучшенной метрологической схемой// Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 8. – С. 44-48.
6. Deithard T. Einteilige wealzfräezer vertreiben kosten aus der Scienfertigung// WB Werkstatt und Betrieb. – 2015, № 3.– P. 30-32.

#### R e f e r e n c e s

1. Belousov, Yu.V. (2016). Modelirovanie silovogo vzaimodejstviya instrumenta pri mehanicheskoj obrabotke rezaniem, *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktsij i Sooruzhenij*, №4, pp. 62-66.
2. Belousov, Yu.V. (2015). Raschet dopuskaemyh napryazhenij dlya otsenki kontaktnoj prochnosti tsilindricheskikh peredach pri pikovoj nagruzke, *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktsij i Sooruzhenij*, №6, pp. 29-32.
3. Belousov, Yu.V. (2015). Analiz napryazhennogo sostoyaniya krugovogo preryvistogo svarnogo shva tavrovyh soedinenij, *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktsij i Sooruzhenij*, №3, pp. 54-58.
4. Belousov, Yu.V. (2016). Opredelenie ostatochnyh napryazhenij pri travlenii konsolno zakreplennogo obraztsa, *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktsij i Sooruzhenij*, №1, pp. 55-60.
5. Olejnik, B.D., Karmanov, V.V., Vinokurov, N. V. (2016). Opredelenie ostatochnyh napryazhenij s primeneniem ustrojstva s uluchshennoj metrologicheskoj shemoj, *Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, № 8, pp. 44-48.
6. Deithard, T. (2015). Einteilige wealzfräezer vertreiben kosten aus der Scienfertigung, *WB Werkstatt und Betrieb*, № 3, pp. 30-32.

#### CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES BY ETCHING CANTILEVERED SAMPLE

Yu.V. Belousov

*Moscow State Technical University named after N. Bauman*

The author describes experimental-and-theoretical method of determination of technological residual stresses with application of layer-by-layer etching of the cantilever-fixed sample. The method of calculation of the residual stresses in the surface layers of the material is corrected.

KEY WORDS: residual stresses, deflection, layer-by-layer etching, the console-fixed sample.