

УДК 621.912

В.И. Котельников<sup>1</sup>, А.О. Краснов<sup>2</sup>, В.П. Кожемякин<sup>2</sup>, А.А. Миронов<sup>3</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОГАЛЬНОМ СТАНКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский военный институт инженерных войск РФ<sup>2</sup>,  
ЦНИИ «Буревестник»<sup>3</sup>**Цель:** Определение изменений поверхностного слоя детали после холодного строгания и термодинамической обработки.**Методика:** Обработка плоской поверхности образца из стали 45 была проведена холодным резанием, резанием с нагревом и накатыванием нагретой поверхности обработанной детали роликом при различном давлении. Эксперименты проведены при различных режимах резания ( $t = 0,5; 1,0$  и  $1,25$  мм  $S=200,0; 300,0$  и  $500,0$  мм/мин). Режим нагрева поверхности при термодинамической обработке изменялся от  $450$  до  $600^\circ\text{C}$ .**Результаты:** В результате было получено доказательство более высокого качества поверхностного слоя детали после резания с нагревом и термодинамической обработки без микро надрывов и трещин.*Ключевые слова:* теория резания, холодная обработка металла, резание с нагревом, термодинамическая обработка металла.

Холодная обработка металла резанием характеризуется образованием на поверхности обработанной детали большого количества микротрещин различной величины. Причиной образования микронадрывов в поверхностном слое является пластическая деформация металла в корне стружки при резании. В классической теории резания характер стружкообразования и пластический сдвиг металла трактуется следующим образом.

Как правило, с целью упрощения деформации в срезаемом слое при резании металла рассматриваются в одной плоскости. Кристаллические объединения, назовем их частицами срезаемого слоя, находящиеся на удалении от линии пластического течения  $CB$  металла в корне стружки, свободны от напряжений и двигаются по направлению к инструменту с определенной скоростью. По мере приближения к режущему инструменту напряжения в рассматриваемой частице будут возрастать.

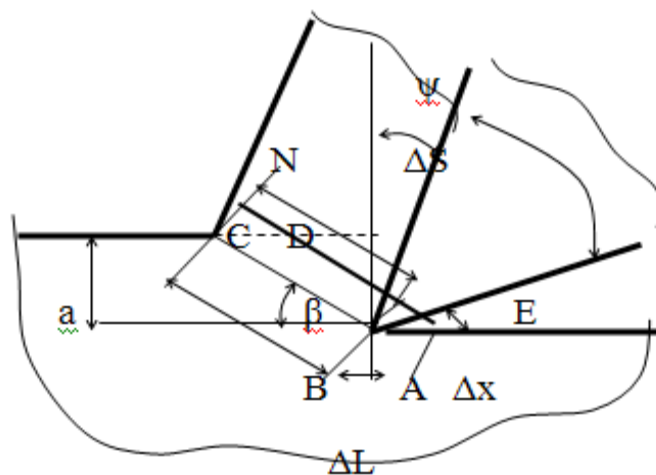


Рис. 1. Схема воздействия режущего клина на металл при резании

В момент, когда напряжения достигнут величины предела упругости, частица начнет

пластически деформироваться. Она получает от действия режущего клина пластическое смещение и меняет направление своего движения. При этом смещении происходит деформация металла (объём  $ABCD$  деформируется в объём  $EBCN$ ) (рис. 1).

В результате такой деформации произойдет отделение части металла от детали. Толщина набегающего металла на режущий клин «а» в отделяемой стружке, благодаря пластическому сдвигу, изменится на  $\Delta S$ . Угол, образованный линией пластического течения частиц металла и направлением набегающего металла на режущий инструмент, получил название угла сдвига и обозначен на рис. 1 буквой  $\beta$ .

Если представить переходную зону пластической деформации в виде параллелограмма  $ABCD$  (рис. 1), а линии скольжения в ней принять за прямые, то сдвиг этой зоны произойдет на величину  $\Delta x$ .

Значение  $\Delta S$  соответствует расстоянию, на которое сдвинулась верхняя сторона квадрата относительно нижней, и называется абсолютным сдвигом. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига пользуются величиной  $\varepsilon$ , относительным сдвигом. Он равен отношению абсолютного сдвига  $\Delta S$  к толщине слоя  $\Delta L$ , претерпевшего этот сдвиг, т.е.  $\varepsilon = \Delta S / \Delta L$ . Геометрически  $\varepsilon$  равен тангенсу угла  $\psi$  наклона стороны квадрата к оси  $z$ , т.е.  $\varepsilon = \operatorname{tg} \psi$ .

Элемент срезаемого слоя  $ABCD$  под действием режущего клина инструмента деформируется и принимает форму параллелограмма  $EBCN$ .

В треугольнике  $CDN$  -  $DN = \Delta x$ ;  $\angle CND = 90^\circ$ ;  $\angle CDN = \psi = \gamma$ ;  $\angle NCD = \beta$ ;

$$NE = \Delta S; \varepsilon = \Delta S / \Delta x = NE / EA = \operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} (\beta - \gamma). \quad (1)$$

Анализ формул (1) показывает, что для определения относительного сдвига при определенном угле  $\gamma$  необходимо знать этот угол. Его можно определить по длине стружки. При перемещении инструмента на  $\Delta l$  длина стружки будет  $\Delta lc$ . Из  $\triangle ABE$  (рис. 1)

$$\Delta lc / \sin \beta = \Delta l / \sin \delta = \Delta l / \cos (\beta - \gamma) \text{ и } \Delta l / \Delta lc = \cos (\beta - \gamma) / \sin \beta.$$

Отношение  $\Delta l / \Delta lc = Kl$  получило название коэффициента усадки стружки:

$$Kl = \cos (\beta - \gamma) / \sin \beta. \quad (2)$$

Данную формулу называют формулой И.А. Тиме. С её помощью можно выразить угол сдвига через коэффициент усадки  $Kl$ :

$$Kl = (\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma) / \sin \beta = \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma + \sin \gamma,$$

откуда 
$$\operatorname{tg} \beta = \cos \gamma / (Kl - \sin \gamma). \quad (3)$$

Несмотря на принятые допущения о замене зоны первичной деформации единственной плоскостью сдвига и идеализации процесса превращения срезаемого слоя в стружку формула Тиме И.А. показывает связь между коэффициентом усадки стружки и углом сдвига  $\beta$ , поскольку отражает условие сплошности материала стружки.

Таким образом, относительный сдвиг при резании зависит от угла сдвига  $\beta$  и переднего угла  $\gamma$ . Угол  $\beta$  можно определить, зная  $\gamma$ . Практически  $\varepsilon = 2-5$ . Определим, при каком  $\beta$  относительный сдвиг будет минимальным. Для этого возьмем первую производную уравнения (3), приравняем ее к нулю и решим уравнение относительно  $\beta$ :

$$d\varepsilon / d\beta = -\operatorname{cosec}^2 \beta + \sec^2 (\beta - \gamma) = 0. \quad (4)$$

Это условие справедливо при  $\beta = 90^\circ - (\beta - \gamma)$ . Тогда  $[\beta]_{\varepsilon \rightarrow \min} = 45^\circ + \gamma / 2$ . Зная относительный сдвиг, можно определить скорость деформации ( $c^{-1}$ ), которая представляет собой отношение максимальной главной деформации  $\varepsilon_{\max}$  к её продолжительности  $\tau_{\text{деф}}$  в единицу времени, т.е.  $V_{\text{деф}} = \varepsilon_{\max} / \tau_{\text{деф}}$ .

В случае неравномерной деформации сдвига её скорость или скорость относительного сдвига определяется как относительный сдвиг в единицу времени  $V_{\text{деф}} = d\varepsilon / dt$ .

От скорости деформации зависит температура, возникшая в результате совершения режущим инструментом работы по сдвигу металла в корне стружки. Наиболее интенсивно

пластическая деформация протекает в узкой зоне, ширина которой принимается за  $\Delta x$ . Время деформации определится из формулы  $\tau_{\text{деф}} = \Delta x / \Delta V_c = (\Delta x \cdot K_l) / V$ , т.е.

$$V_{\text{деф}} = \varepsilon V / \Delta x K_l. \quad (5)$$

Скорость деформации при резании очень высока. По данным [1], при обработке конструкционных сталей обычного качества  $\Delta x = 0,02 - 0,005 \text{ мм}$ ;  $\varepsilon = 2 - 5$ ;  $K_l = 2,0 - 4,0$ . При скорости резания  $60 \text{ м/мин} = 100 \text{ см/с}$  скорость деформации будет равна  $V_{\text{деф}} = 4000 \text{ с}^{-1}$ .

Высокие скорости деформации не позволяют установить четкую границу между хрупкими и пластичными материалами, так как один и тот же материал в зависимости от характера напряженного состояния при резании и скорости деформации может вести себя различно. Поскольку полное описание механизма образования стружки сложно, для анализа напряжений и деформаций при резании реальный процесс образования стружки заменяют упрощенной моделью. При этом не принимают во внимание искажение формы полученного сечения реальной стружки и увеличение её ширины, а её поперечное сечение представляют в виде прямоугольника с высотой, равной средней толщине стружки, и шириной, равной первоначальной ширине резания.

При резании металла с нагревом в обрабатываемый металл вводится дополнительное тепло, которое совместно с теплом, образованным за счет совершаемой работы резания, разогревает как деталь, так и сходящую с резца стружку. Именно поэтому экспериментальные замеры температуры нагрева сходящей стружки выше теоретической средней температуры в срезаемом слое металла. Например, средняя температура стружки, получающейся в результате среза слоя толщиной в 4 мм будет:

$$T = (1000 + 800 + 600 + 450) / 4 + \Delta T = 712,5^\circ \text{ С.} + \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – приращение температуры в зоне резания за счет совершенной работы резания. Численное значение приращения температуры можно определить теоретически, прибегая к зависимостям теплопроводности, либо в результате эксперимента замером температуры сходящей с резца стружки.

С учетом приведенных данных пластические свойства стружки в корне стружки при стружкообразовании будут выше, чем у срезаемого слоя перед корнем стружки. Другими словами, процесс пластического деформирования кристаллов на линии скалывания (рис. 1) будет идти в режиме пластического течения не отдельных слоев деформированного металла толщиной  $\Delta x$ , а тончайшим слоем, с размерами сопоставимыми с размерами, отдельных кристаллов.

Скорость  $V$  набегающего на резец слоя толщиной «а» срезаемого металла определится как первая производная расстояния  $\Delta l$  по времени  $\Delta t$ . Величина этой скорости численно равна величине скорости деформации или скорости смещения кристаллов в корне стружки вдоль плоскости сдвига  $V_t$  и скорости движения стружки  $V_c$  толщиной  $ac$ , вдоль передней поверхности резца. Движение металла при таком стружкообразовании можно сравнить с потоком жидкости, проходящей последовательно через несколько различных сечений. В соответствии с законом сохранения количества движения секундный расход будет определяться произведением скорости на поперечное сечение потока. В силу того, что стружка при своем движении будет тормозиться силой трения о переднюю поверхность резца, скорость  $V_c$  будет отличаться от скорости пластического течения  $V_t$ . В то же время пластическое течение вдоль линии сдвига кристаллов идет с очень большими скоростями. Для сохранения равенства потоков скорость течения стружки  $V_c$  должна снизиться, а величина толщины стружки – возрасти при неизменной ширине среза «а», равном глубине резания. Данное утолщение стружки на коротком участке, до момента отрыва стружки от передней поверхности резца, наглядно видно при рассматривании внутренней волнистой поверхности стружки металла, обработанного с нагревом.

При резании с нагревом образуется стружка, имеющая серый металлический цвет с абсолютно гладкой внутренней по отношению к резцу поверхностью.

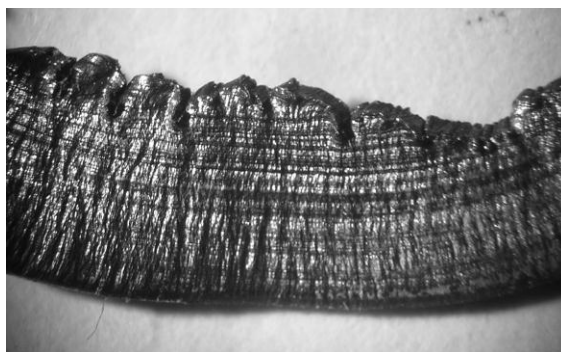


Рис. 2. Фотография стружки, полученной в результате резания ст. 45 с нагревом при  $V=47$  м/мин

В результате резания с нагревом происходит срезание слоев металла без образования микро надрывов поверхностного слоя обрабатываемой детали. Проверим это экспериментально.



Рис. 3. Внешний вид строгания нагретой поверхности детали на строгальном станке



Рис. 4. Внешний вид накатывания нагретой поверхности детали роликовым накатником на строгальном станке

Обработка плоской поверхности образца из ст. 45 была проведена холодным резанием, резанием с нагревом и накатыванием нагретой поверхности обработанной детали роликом при различном давлении. Эксперименты проведены на строгальном станке при различных режимах резания ( $t = 0,5; 1,0$  и  $1,25$  мм  $S=200,0; 300,0$  и  $500,0$  мм/мин). Режим нагрева поверхности при термодинамической обработке от  $450$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Режимы накатывания роликом нагретой поверхности те же, что и при холодном строгании. Процесс термодинамиче-

ской обработки был зафиксирован на видео, а образцы сфотографированы. Фотография процесса строгания нагретой поверхности детали на столе строгального станка показана на рис. 3, а фотография процесса накатывания роликом – на рис.4.

Для проведения эксперимента станок был дооборудован деревянным лотком с водой (отчетливо видимым на рис. 3 и 4) для охлаждения резца и ролика в конце рабочего хода инструмента. Экспериментальная проверка проводилась с повторением каждого прохода резца и ролика. Замер температуры нагрева поверхности определялся термопарой касания, тарированной в градусах Цельсия.

После обработки поверхности плоской детали холодным строганием и термодинамической обработкой проводился замер шероховатости поверхности под бинокулярным микроскопом (табл. 1).

Таблица 1

Результаты замеров шероховатости поверхности

Вид обработки	Режимы обработки металла				Параметры шероховатости Ra, мкм
	Температура нагрева поверхности, T °С	Величина подачи инструмента, S, мм/мин	Глубина резания, t мм	Усилие накатывания, кН	
Холодное строгание	-	500	0,5	-	12,5
	-	500	1,0	-	12,5
	-	500	1,5	-	25,0
Строгание нагретой поверхности	450	500	1,5	-	6,3
	500	500	2,5	-	6,3
	550	500	4,0	-	3,2
	600	500	5,5	-	3,2
Поверхностное деформирование нагретой поверхности	450	500	-	1,156	1,25
	500	500	-	1,045	1,25
	550	500	-	0,870	0,8
	600	500	-	0,643	0,8
Поверхностное деформирование холодное	20	500	-	4,023	2,5
	20	500	-	4,560	2,5
	20	500	-	4,730	1,6
	20	500	-	5,380	1,6

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты: шероховатость поверхности после холодной обработки строганием Ra = 12,5 – 25,0 мкм, шероховатость поверхности после термодинамической обработки Ra = 1,6 – 2,5 мкм.

Затем измеряли твердость поверхностного слоя на косом срезе. Результаты замеров сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты замера микро твердости поверхностного слоя

Вид обработки	Замеры микротвердости на глубине среза, HV кг/мм <sup>2</sup>				
	0мм	0,02мм	0,04мм	0,06мм	0,08мм
Поверхность обработана холодным строганием	250	230	210	180	140
Нагретая до 500°С поверхность обработана строганием	100	50	30	10	0
Поверхность, полученная деформированием с нагревом до 600°С	150	110	85	54	25
Поверхность, полученная холодным деформированием	300	270	240	200	140

Как правило, после холодной обработки строганием на поверхности образуется наклеп. После ТДО величина наклепа снижается в 1,5–2,0 раза. ППД по нагретой поверхности несколько повышает микротвердость.

Для исследования качества поверхностного слоя после каждого вида обработки образцы разрезались в поперечной плоскости на пластинки толщиной 10 мм. Нарезанные пластинки шлифовались и подвергались исследованию изменений структуры поверхностного слоя под инструментальным микроскопом при увеличении  $\times 200$ . Структура поверхностного слоя показана на фотоснимке (рис. 5).

Поверхностный слой образцов после строгания имеет характерные микронадрывы, образованные вследствие сдвиговой деформации металла в корне стружки. Поверхностный слой металла после резания с нагревом не содержит этих дефектов. Фотография структуры металла показана на рис. 6.

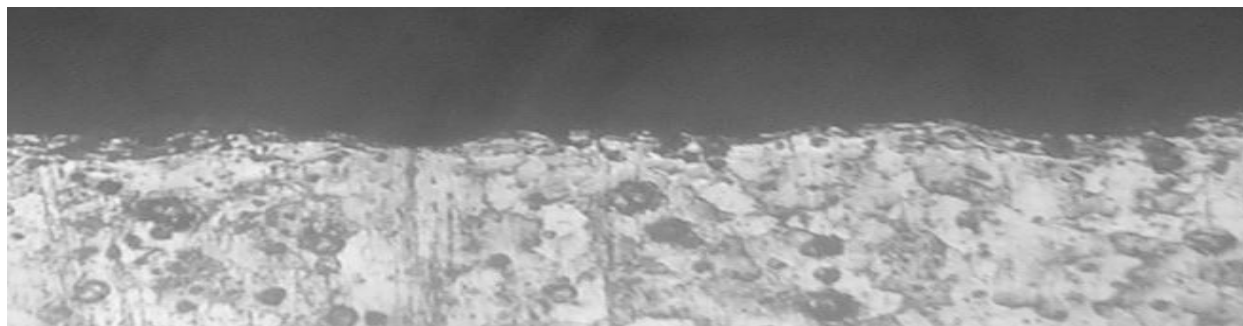


Рис. 5. Фотография поверхности среза детали после холодного строгания ( $\times 100$ )



Рис. 6. Фотография поверхности среза детали после строгания с нагревом ( $\times 200$ )

### Выводы

1. Процесс строгания нагретого до температур разупрочнения металла характеризуется получением поверхностного слоя детали без микронадрывов с пониженной величиной наклепа.

2. Поверхность детали после ТДО обладает значительно меньшими параметрами шероховатости и не требует дополнительных отделочных операций (например, шлифования).

3. Процесс термодинамической обработки можно ускорить за счет увеличения подачи инструмента, а следовательно, значительно удешевить процесс изготовления деталей.

### Библиографический список

1. **Бобров, В.Ф.** Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. **Грановский, Г.И.** Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Машиностроение, 1985. – 389 с.
3. **Талантов, Н.В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

4. **Старков, В.К.** Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
5. **Котельников, В.И.** Особенности резания металла с предварительным нагревом срезаемого слоя / В.И. Котельников, В.А. Зотова // Современные технологии в машиностроении: VI всероссийская научно-практическая конференция. – Пенза: ПГТУ, 2003. С. 335–339.

*Дата поступления  
в редакцию 30.06.2012*

**V. I. Kotelnikov<sup>1</sup>, S. A. Krasnov<sup>2</sup>, V. P. Kozhemyakin<sup>2</sup>, A.A. Mironov<sup>3</sup>**

### **EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE METHOD OF THERMODYNAMIC TREATMENT IN THE PLANER**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y.Alexeev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod military institute corps of engineers RF<sup>2</sup>,  
CRI "Petrel"<sup>3</sup>

**Purpose:** Determination of changes in the surface layer of the detail after cold planing and thermodynamical metalcutting.

**Methodology:** Processing of the flat surface of a sample of the steel 45 (CIS GOST) was carried out with cold cutting, cutting with heating and rolling the heated surface of the machined detail with roller at different pressures. Experiments were conducted at different cutting conditions ( $t = 0,5; 1,0$  and  $1,25$  mm  $S = 200,0; 300,0$  and  $500.0$  mm / min). Mode of heating surface in the thermodynamic treatment varied from  $450$  to  $600$  ° C.

**Value:** As a result, evidence was obtained of a higher quality of the surface layer of parts after cutting the heating and thermodynamic process without micro-tears and cracks.

*Key words:* cutting theory, cold-working, cutting with heating, thermodynamical metalcutting.