

упругих перемещений оси вала между максимальным Y_{xc} и минимальным Y_{oc} при $\frac{x}{l} = \left(\frac{x}{l}\right)_0$ перемещениями

$$\Delta D_{ср}^{max} = 2(P_y - P_0) \Delta W, \quad (4)$$

$$\Delta W = \frac{1}{\frac{1}{W_{зб}} + \frac{1}{W_{пб}} + \frac{1}{W_p}} - \frac{1}{\frac{1}{W_{зб}} + \frac{1}{W_p}},$$

где ΔW - разность между податливостью ТС в лимитирующем сечении вала и в начале обработки при $x=0$.

Если максимальную погрешность ограничить допуском δ на изготовление цилиндрической поверхности вала, то получим зависимость, используя которую можно проектировать технологический процесс совмещенной обработки резанием резцом с одновременным обкатыванием роликом, обеспечивая заданную точность,

$$\delta \leq 2(P_y - P_0) \Delta W. \quad (5)$$

Заключение. Анализируя составляющие зависимости (5), можно заключить, что управление точностью осуществляется:

- за счет изменения податливости W_p пружины комбинированного инструмента;
- за счет установления величины усилия P_0 , меняя угол φ установки ролика относительно обрабатываемой поверхности, профильного радиуса r ролика, радиального угла β расположения оси ролика относительно опорной плоскости резца, $\beta \leq \arccos(P_y / P_0)$;
- за счет изменения величины радиальной силы P_y путем выбора параметров режима обработки, устанавливая глубину резания, обеспечивающую необходимую точность обработки (рис. 4). Таким образом, представленные математические зависимости и методика расчета погрешности позволяют осуществить управление точностью, используя для этого оптимизацию режимов резания и параметров совмещенной обработки комбинированным инструментом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шнейдер Ю. Г. Инструмент для обработки металлов давлением / Ю. Г. Шнейдер. – М.: Машиностроение, 1970 – 248 с.
2. Чистосердов П. С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск: Беларусь, 1977 – 128 с.
3. Шатуров Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск: Техопринт, 2001 – 460 с.

Материал поступил в редакцию 17.03.08

MROCHEK Zh. A., SHATUROV G.F., ZHOLOBOV A.A., SHATUROV D.G. PROMISING TECHNOLOGY OF COMBINED SHAFT MACHINING AND ROLLING

Combined machining and rolling by a combined tool consisting of two different elements, cutting and rolling ones presupposes their balance as to endurance. The paper analyses the influence of existing cutting tools including highly-enduring tools having microrenewed cutting edge on dependability of the process and the quality of machining.

The problems of accuracy are considered and mathematical dependencies enabling errors in combined machining to be found are given. The ways for accuracy control in shapeforming of shaft surfaces are pointed out.

УДК 621. 941. 1.

Мрочек Ж.А., Шатуров Д.Г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Введение. Управление термической и силовой напряженностью процесса резания можно осуществлять путем предварительного изменения физико-механических свойств срезаемого слоя металла, воздействуя на него поверхностным (ППД) или опережающим (ОПД) пластическим деформированием [1]. Предварительное пластическое деформирование срезаемого слоя металла, как правило, осуществляется обкатыванием роликом как поверхности резания [1], так и необработанной поверхности (авт. св. 933266, СССР; 1673275, СССР) с регулированием глубины и степени пластического деформирования за счет усилия P_d обкатывания. При этом пластическое деформирование поверхности резания может проводиться не по всей ширине срезаемого слоя металла. В последнем случае - это резание с частичным опережающим пластическим деформированием (ЧОПД) (авт. св. 1535672, СССР).

При резании моменту стружкообразования предшествует процесс сжатия полоски металла передней поверхностью перемещающегося относительно заготовки инструмента с последующим сдвигом некоторой ее части по линии наибольших касательных напряжений и отрывом от основы по линии расположения лезвия за счет растягивающих напряжений.

Общие положения. Совершаемая резцом в результате стружкообразования работа A_ϕ по изменению формы отделяемой части полоски металла (увеличение толщины и уменьшение ее длины) может быть оценена зависимостью [3]

$$A_\phi = \frac{1+\mu}{6E} 2\sigma_S^2,$$

где σ_S , E - соответственно предел текучести и модуль упругости материала заготовки; μ - коэффициент Пуассона.

Известно, что согласно энергетическому условию пластичности, переход материала тела из упругого состояния в пластическое происходит при выполнении условия Губера-Мизиса

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_S^2,$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 - главные нормальные напряжения.

В случае предварительного обкатывания роликом поверхности резания и (или) необработанной поверхности в последней создаются остаточные сжимающие (осевые и тангенциальные) и растягивающие напряжения, которые свидетельствуют, согласно теории пластичности металлов, о произведенной работе роликом в результате деформации некоторого объема металла, расположенного на некотором расстоянии от обкатываемой поверхности. В результате пластической деформации поверхности уменьшается запас пластичности и прочности упрочненного металла, происходит его охрупчивание на некоторую глубину от места приложения усилия обкатывания. В процессе формообразования резец в некотором объеме металла, прилегающему к поверхности, создает дополнительное силовое поле из сжимающих и растягивающих напряжений. Это способствует переходу напряженного состояния отделяемого от заготовки элементарного объема металла при стружкообразовании в пластиче-

ское при меньших усилиях резаниях. Таким образом, при резании с ОПД или с ЧОПД часть общей работы, совершаемой резцом в процессе резания, предварительно совершает ролик, уменьшая тем самым работу по пластической деформации срезаемого слоя металла.

Специальной конструкцией деформирующего элемента-ролика, например, с выступом на его рабочей части, можно довести в локальной области деформирующей поверхности пластическую деформацию равную или близкую к пределу прочности обрабатываемого металла. В этом случае при резании будет происходить разрыв сплошности образуемой стружки, тем самым обеспечивая автоматическое ее дробление (авт. св. 1191185, СССР).

При резании процесс стружкообразования начинается с момента, когда касательные напряжения в некоторой зоне металла, расположенной впереди лезвия инструмента, достигают предела текучести и заканчивается процесс формирования стружки на линии окончательного упрочненного металла, расположенной за условной плоскостью сдвига, где касательные напряжения равны пределу текучести. При резании предварительно упрочненного в результате ОПД металла процесс вторичной пластической деформации срезаемого слоя начинается в зоне ближе расположенной к условной плоскости сдвига. В то же время, потеря некоторой доли пластичности упрочненного при ОПД металла приводит к уменьшению на 25-30 % усадки стружки и к увеличению угла сдвига. В результате условная плоскость сдвига приближена к линии окончательного формирования стружки, что обуславливает общее сужение зоны пластического деформирования металла при стружкообразовании, уменьшение силовой напряженности процесса и работы по стружкообразованию.

Результаты исследований

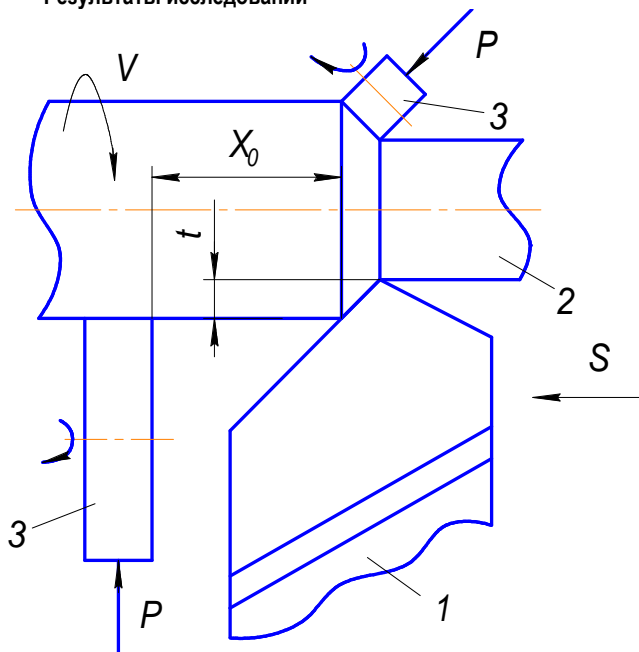


Рис. 1. Схема обработки резанием с опережающим пластическим деформированием: 1 - резец; 2 - обрабатываемая заготовка; 3 - ролик

Для анализа влияния остаточных напряжений, созданных после ОПД роликом, на тангенциальную составляющую P_z силы резания, рассмотрим общий случай распределения остаточных сжимающих и растягивающих тангенциальных напряжений после ОПД необработанной поверхности (рис. 1). Примем закон изменения остаточных тангенциальных напряжений σ_τ параболическим (рис. 2). Тогда

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_{\tau 0} - \sigma_{\tau n}}{t_1^2} t_x^2 - 2 \frac{(\sigma_{\tau 0} - \sigma_{\tau n})}{t_1} t_x - \sigma_{\tau n},$$

$$\text{где } \sigma_{\tau n} = \sigma_{\tau 0} \frac{t_0^2 - 2t_0 t_1}{(t_0 - t_1)^2};$$

t_1 – глубина расположения максимальных остаточных тангенциальных напряжений сжатия; t_x – текущая глубина расположения слоя металла от поверхности; $\sigma_{\tau 0}$ – максимальная величина тангенциальных напряжений сжатия; $\sigma_{\tau n}$ – величина тангенциальных сжимающих напряжений на поверхности детали.

Поскольку в радиальном сечении заготовки детали действуют остаточные сжимающие напряжения, то, очевидно, при резании необходимо дополнительно создать меньшие рабочие сжимающие напряжения, чтобы достигнуть на условной плоскости сдвига напряжения, равного пределу текучести, соответствующего наступлению пластического состояния металла.

Эффективность процесса обкатки с ОПД оценивается безразмерным параметром [2]

$$\eta_{PZ} = \frac{P_z - P_{z0}}{P_z} = 1 - \frac{P_{z0}}{P_z},$$

где P_z, P_{z0} – тангенциальные составляющие сил резания при обработке резанием без ОПД и с ОПД соответственно.

Параметр η_{PZ} с учетом тангенциального напряжения σ_τ равен

$$\eta_{PZ} = \frac{F_{1\sigma}}{F_\sigma},$$

$$\text{где } F_\sigma = \sigma_{\tau 0} t_x; F_{1\sigma} = - \int_0^{t_x} \sigma_\tau dt.$$

Проведем преобразования и получим

$$\eta_{PZ} = \frac{\sigma_{\tau n}}{\sigma_{\tau 0}} + \left(1 - \frac{\sigma_{\tau n}}{\sigma_{\tau 0}}\right) \left(\frac{t_x}{t_1} - \frac{t_x^2}{3t_1^2}\right),$$

где t_x – текущая глубина резания или толщина срезаемого слоя металла.

Анализ представленной зависимости показывает, что параметр η_{PZ} меняется по параболическому закону с расположением вершины параболы при $t_x = 1,5t_1$, где параметр η_{PZ} принимает максимальное значение (рис. 2)

$$\eta_{PZ} = 0,75 + 0,25 \frac{\sigma_{\tau n}}{\sigma_{\tau 0}}.$$

От величины $\sigma_{\tau n}$ напряжения сжатия на обкатанной наружной поверхности заготовки будет зависеть и глубина t_0 расположения нейтральной точки, где напряжения сжатия переходят в растягивающие.

$$t_0 = t_1 \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{\tau 0}}{\sigma_{\tau 0} - \sigma_{\tau n}}}\right);$$

при $t_x = t_0$ имеем

$$\eta_{PZ} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\sigma_{\tau n}}{\sigma_{\tau 0}} + \sqrt{\frac{\sigma_{\tau 0} - \sigma_{\tau n}}{\sigma_{\tau 0}}}\right).$$

Поскольку с увеличением величины $\sigma_{\tau n}$, то есть при уменьшении глубины t_1 расположения максимальных тангенциальных напряжений, параметр η_{PZ}^{\max} увеличивается с $\eta_{PZ} = 0,75$ при $\sigma_{\tau n} = 0$ ($t_0 = 2t_1$) до $\eta_{PZ} = 1,0$ при $\sigma_{\tau n} = \sigma_{\tau 0}$ ($t_1 = 0$), то наибольшего эффекта уменьшения силовой напряженности можно достигнуть, например, при шлифовании упрочненной поверхности с малыми глубинами резания. При точении это не достижимо, так как с уменьшением глубины процесс резания, из-за наличия радиуса скругления режущей кромки, вырывается в процесс ППД. В том случае, когда глубина резания больше величины t_0 , то в зоне пластической деформации срезаемого резцом

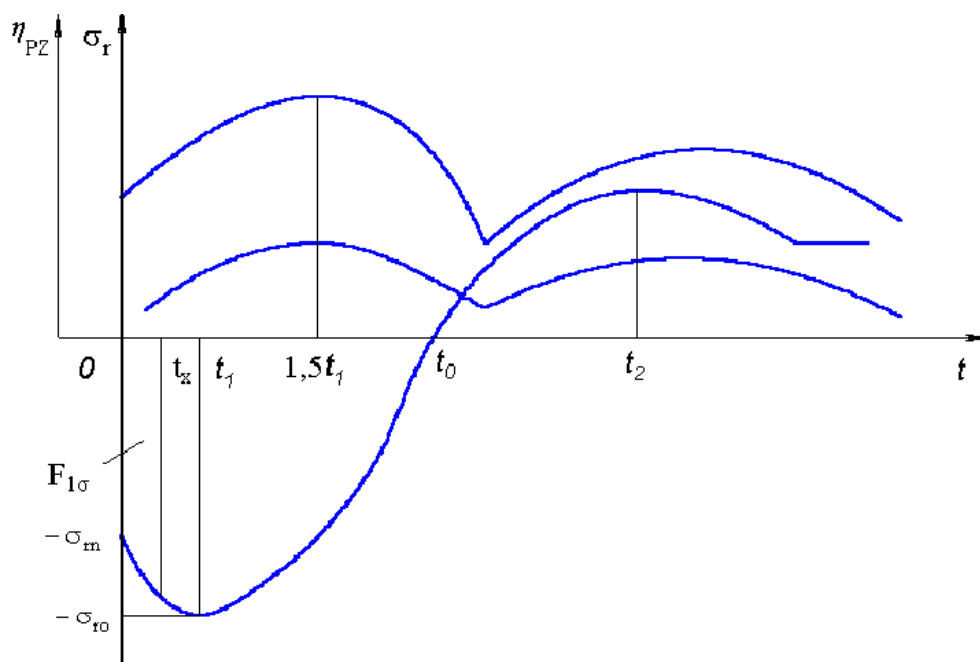


Рис. 2. Схема распределения тангенциальных остаточных напряжений (1) и изменение параметра η_{PZ} эффективности процесса резания с ОПД (2) ($\sigma_{\tau 0}$, t_1 – максимальное тангенциальное сжимающее напряжение и глубина его залегания; σ_m – тангенциальное сжимающее напряжение на поверхности; 3 – фактическое значение η_{PZ})

слоя металла располагаются растягивающие остаточные напряжения, которые способствуют при меньших усилиях резания отрыву отделяемого от заготовки объема металла. Предполагая, что тангенциальные растягивающие напряжения по сечению меняются также по параболическому закону, получим следующую зависимость для параметра η_{PZ}

$$\eta_{PZ} = \frac{t_x - t_0}{t_2 - t_1} - \frac{(t_x - t_0)^2}{3(t_2 - t_0)^2}$$

Таким образом, с увеличением $t_x > t_0$ имеем при $t_x = 1,5t_2 - 0,5t_0$ второй максимум параметра η_{PZ} , который свидетельствует о положительном влиянии предварительно созданных растягивающих напряжений на динамику процесса резания.

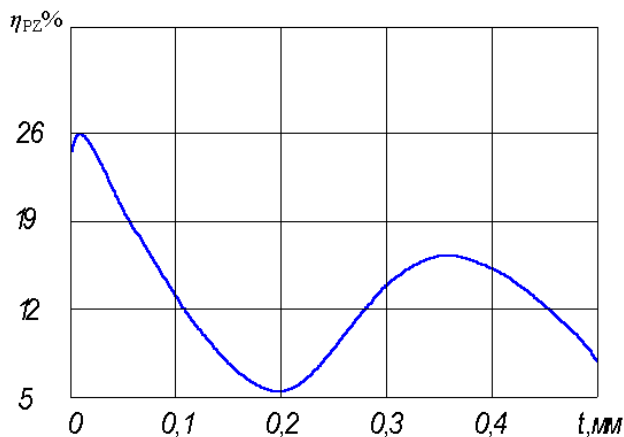


Рис. 3. Зависимость параметра η_{PZ} от глубины резания t при обработке заготовки вала с ОПД необработанной поверхности (материал заготовки – сталь 12Х18Н9Т; $S=0,43$ мм/об; $V=35$ м/мин; $P=700$ Н)

Экспериментальная проверка эффективности процесса резания с ОПД и выявления характера изменения параметра η_{PZ} от глубины резания проводилась при точении нержавеющей стали 12Х18Н9Т резцом ВК8 с параметрами заточки: $\gamma_3=12^\circ$, $\alpha_3=12^\circ$, $\phi=90^\circ$, $\phi_1=10^\circ$. Для получения при ОПД расположения максимальных остаточных

напряжений ближе к наружной поверхности заготовки была использована контактно-сдвиговая схема пластического деформирования металла роликом диаметра $D_P=120$ мм при диаметре заготовки $D=100$ мм. Исследования по влиянию глубины резания на параметр η_{PZ} подтвердили правильность теоретических расчетов о наличии двух оптимальных значений глубины резания, величина которых превосходит на 50% глубину резания соответствующих максимальных сжимающих и растягивающих напряжений (рис. 3).

В результате исследований получены уравнения регрессии для параметра η_{PZ} и рациональные режимы обработки, обеспечивающие значение параметра $\eta_{PZ} \geq 20\%$ для диапазона глубин резания $t=0,2 - 0,5$ мм.

$$\eta_{PZ} = 469t_x^2 + 343t_x - 84S^2 - 93S + 1,88 \cdot 10^{-3}P_D^2 - 83 \cdot 10^{-3}P_D - 24\left(\frac{X_0}{S}\right)^2 + 29\frac{X_0}{S} - 35$$

где $t=0,35 - 0,4$ мм; $S=0,3 - 0,5$ мм/об; $P_D=700 - 1000$ Н; $(x_0/S)=0,6$; P_D – усилие деформирования, X_0 – расстояние от режущей кромки резца до рабочей поверхности ролика.

Заключение. Уменьшение тангенциальной составляющей усилия резания в большей степени (до 25 – 35%) обеспечивается при малых ($t_x < 0,2$ мм) и в меньшей степени при средних ($t_x = 0,3 - 0,4$ мм) глубинах резания, что полностью подтверждает теоретические предпосылки.

Таким образом, уменьшение усилия при резании предварительно упрочненной поверхности опережающим или раздельным поверхностным пластическим деформированием можно достигнуть как при точении, фрезеровании и зенкерования, так и при шлифовании, поскольку эффективность процесса повышается при снятии малых глубин резания, характерных для шлифования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подураев В.Н. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева. Вестник машиностроения. - №4, 1976. - С. 64-65.

2. Подураев В.Н. Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева. Вестник машиностроения. - №12, 1972. - С. 58-61.
3. Сторожев М.И. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. 3-изд. - М.: Машиностроение, 1971. - 424 с.

Материал поступил в редакцию 20.05.08

MROCHEK Zh. A., SHATUROV D.G. TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES OF INCREASE OF INTENSITY OF PROCESS OF CUTTING

It is shown, that the management of thermal and power intensity of process of cutting can be carried out by preliminary change of physical and mechanical properties of a layer of metal of cutting, influencing a processable surface by simultaneous or outstripping plastic change. The laws of reduction of effort of cutting are established at to grind, to mill and to grind of surfaces of preparations of details.

УДК 621.7

Шматов А.А.

КОМБИНИРОВАННОЕ ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Введение. Поскольку технический прогресс развивается в направлении снижения себестоимости продукции, а это невозможно без применения высокопроизводительных процессов и использования более износостойких инструментов, задача повышения эксплуатационной стойкости режущего инструмента остается по-прежнему актуальной. Увеличение износостойкости инструмента даст значительную экономию энергетических, материальных и трудовых ресурсов, снизит простой оборудования при замене изношенного инструмента и в целом повысит производительность труда.

Острота и насущность вопроса состоит в том, что уже существует множество способов поверхностного и несколько меньше объемного упрочнения, однако эти методы довольно часто не взаимосвязаны между собой и поэтому применение их не всегда эффективно. На практике случается, что на инструмент наносят очень твердые износостойкие покрытия, не принимая во внимание внутреннюю структуру инструментального материала, который может быть изначально хрупок или не достаточно прочен, а в результате такой инструмент либо ломается, либо сминается и выходит из строя раньше срока. И при такой важности вопроса еще недостаточно внимания обращают комплексному подходу, который требует эффективного сочетания поверхностных и объемных методов упрочнения в зависимости от вида инструмента и класса инструментального материала. Такой подход путем комбинирования новых методов поверхностного и объемного упрочнения предусматривает формирование оптимальной структуры поверхности и основы инструментального материала с целью создания высокого уровня физико-механических и эксплуатационных свойств инструмента.

В последнее время все больше и больше внимания уделяют различным комбинированным способам упрочнения инструмента и деталей машин. Однако подавляющее большинство исследований носит односторонний характер, т.е. в основном комбинируют поверхностные методы упрочнения, не принимая во внимание объемные упрочняющие технологии [1-5 и др.]. При этом комбинируют методы химико-термической, лазерной, ионно-плазменной, ультразвуковой, вибромеханической и прочие виды поверхностных обработок. Напротив, известно незначительное число работ [6-9] по химико-термоциклической обработке (ХТЦО) стального инструмента и изделий, где комбинируют поверхностный метод упрочнения - диффузионное насыщение стали углеродом, бором и др. элементами с объемным - термоциклической термообработкой. Основным недостатком указанного поверхностно-объемного метода упрочнения является его большая трудоемкость из-за длительности и высоких температур проведения процесса. Других исследований в области объемно-поверхностного упрочнения инструмента и изделий практически не проведено.

В данной работе предложены новые процессы упрочнения инструмента: для объемного упрочнения - (1) упрочняющая термоциклическая обработка, а для поверхностного упрочнения - (2) низко-

температурная наногидрохимическая обработка. При комбинировании этих процессов открываются большие возможности их практического применения

(1). Обращаясь к объемным методам упрочнения хотелось бы отметить, что с давних времен самым простым и распространенным способом упрочнения инструмента является термообработка. Среди различных способов термообработки следует выделить метод «упрочняющей термоциклической обработки» (УТЦО), который основан «на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов» [6, 10-13]. Если традиционная термообработка выполняется по одному варианту путем закалки и отпуска (рис.1), то метод УТЦО может иметь более 20 вариантов, которые отличаются от стандартной термообработки термоциклическим режимом (многократным повторением) и различной последовательностью выполнения операций закалки и отпуска. По структурным изменениям в сталях УТЦО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с полными или неполными фазовыми превращениями при нагреве и охлаждении, с различными типами фазовых превращений: бездиффузионным (аустенита в мартенсит), диффузионным (аустенита в перлит) или комбинации этих типов. По температурно-временным параметрам УТЦО можно разделить на следующие виды: средне-, высоко- или низкотемпературный процесс, процесс с изотермической или без изотермической выдержки (для достижения полной или неполной аустенизации) и другие. Основными структурными изменениями при УТЦО является сильное измельчение зерна и блоков мозаики, увеличение плотности дислокаций, уменьшение размера карбидов, однородное распределение химических элементов в структуре, повышение однородности и степени легирования твердого раствора, снижение степени тетрагональности мартенсита и др. Эти позитивные структурные изменения существенно улучшают эксплуатационные свойства инструмента. В частности, УТЦО повышает вязкость, прочность (при изгибе и растяжении), твердость, теплостойкость, контактную выносливость, изотропность свойств и износостойкость сталей, уменьшает деформацию и опасность закалочных микротрещин по сравнению с традиционной термообработкой [6, 7, 10-13].

На основании приведенного анализа можно сделать вывод, что объемное упрочнение инструментальной стали методом УТЦО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструмента с малым ресурсом работы и для инструмента многоцелевого назначения.

(2) Обращаясь к поверхностным методам упрочнения инструмента следует отметить, что на практике широко применяют различные технологии получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий. К лучшим низкотемпературным способам поверхностного упрочнения относится процесс CVD (химического осаждения из паровой фазы), активируемый плазмой для осаждения на поверхность изделий таких тонких пленок из тугоплавких соединений, при кото-

Шматов Александр Анатольевич, к.т.н., докторант кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.