

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

*Д.А. Иванов, к.т.н., доц., А.А. Колосков, асп., В.С. Зюкин, асп.,
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

Выполнено исследование возможности повышения стойкости металлорежущего, а также штампового инструмента из углеродистых и легированных, быстрорежущих сталей, включая готовый инструмент, путем обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком.

Результаты проведенного исследования показали высокую эффективность воздействия пульсирующего газового потока на эксплуатационные свойства инструментальных сталей, в том числе готового инструмента, что повышает его производительность при изготовлении и ремонте деталей двигателей.

Сочетание термической обработки с обработкой пульсирующим дозвуковым газовым потоком, обеспечивает сокращение в 2–4 раза продолжительности технологического процесса упрочняющей термообработки инструмента, что ведет к снижению его стоимости, притом что инструмент обладает более высокими значениями показателей твердости.

Углеродистые инструментальные стали, содержащие более 0,8 % углерода (заэвтектоидные), широко используют для изготовления различных инструментов, таких как вытяжные штампы для холодной штамповки с диаметром пуансона до 25 мм, другой инструмент, применяемый при холодном пластическом деформировании, а также режущий инструмент, не испытывающий в процессе работы нагрева выше 190–200 °С, а именно: инструмент для удаления забоин на рабочих лопатках компрессоров авиадвигателей, ручные метчики, метчики машинные мелко-размерные, плашки, мелко-размерные развертки, надфили, измерительный инструмент простой формы (гладкие калибры, мерительные скобы и т. д.).

Стандартная упрочняющая термическая обработка подобных изделий из данных сталей заключается в неполной закалке с температуры 760–780 °С, соответствующей аустенитно-цементитной структуре с получением структуры, состоящей из мартенсита закалки и вторичного цементита и последующего отпуска при нагреве до температуры, не превышающей 150–170 °С



(это обеспечивает сохранение твердости на уровне 62–63 HRC) с последующей выдержкой при данной температуре продолжительностью 1–2,5 ч в зависимости от сечения изделия. Отсутствие отпуска после закалки делает инструмент слишком хрупким, закалочные остаточные напряжения сохраняются, а микроструктура его материала остается метастабильной, что в совокупности ведет к выкрашиванию режущей кромки и образованию трещин.

Задача повышения стойкости инструмента всегда актуальна, так как ее решение позволяет снизить затраты при изготовлении и восстановительном ремонте любых изделий, в том числе элементов двигателей.

Первоначально исследовалась возможность сокращения продолжительности технологического процесса упрочняющей термической обработки заэвтектоидных углеродистых инструментальных сталей с целью обеспечения более высоких значений показателей твердости, при этом инструмент не должен становится более хрупким.

В ходе исследования образцы углеродистой инструментальной стали У10–У13 подвергались закалке при температуре 760–780 °С на структуру, состоящую из мартенсита закалки и вторичного цементита, после чего при комнатной температуре осуществлялась обработка в течение 10–15 минут пульсирующим дозвуковым воздушным потоком частотой 1130–2100 Гц и звуковым давлением 120–140 дБ, который оказывает комплексное влияние на метастабильную структуру мартенсита и способствует протеканию в ней процессов, аналогичных превращениям при низком отпуске, вызывая при этом более значительное снижение остаточных напряжений, чем при низком отпуске.

Испытания, проведенные на образцах из углеродистой инструментальной стали У12 показали, что после описанной технологии обработки их твердость до двух единиц HRC превышает твердость после стандартного отпуска.

При этом ударная вязкость после обработки не уступает ударной вязкости образцов после аналогичной закалки и стандартного отпуска, что может быть объяснено, прежде всего, более интенсивной, чем при отпускном нагреве релаксацией остаточных закалочных напряжений в результате распространения в стали механических волн, генерируемых пульсациями газового потока.

Данная технология позволяет применять обработку пульсирующим газовым потоком к режущему, штамповому и другому инструменту из заэвтектидных углеродистых инструментальных сталей, подвергаемых закалке на мартенситно-цементитную структуру.

Таким образом, достигнуто сокращение в 2–4 раза продолжительности технологического процесса упрочняющей термической обработки углеродистых инструментальных сталей, что снижает стоимость инструмента и обеспечивает более высокие значения показателей твердости, притом что инструмент не становится более хрупким.

В дальнейшем были проведены исследования влияния обработки пульсирующим воздушным потоком (газоимпульсной обработки) [1, 2] закаленных инструментальных сталей на их теплостойкость с использованием образцов из углеродистой инструментальной стали У8.

Закалку начинали от температуры 760 °С в воду на твердость 62–63 HRC с последующим обдувом без нагрева пульсирующим дозвуковым воздушным потоком частотой до 1200 Гц и звуковым давлением порядка 130 дБ, продолжительностью 15 мин. В результате обработки твердость образца снизилась до 61 HRC, что свидетельствует о протекании в закаленной стали под действием пульсаций газового потока процессов, соответствующих низкому отпуску.

Контрольные образцы вместо обдува подвергались отпуску при температуре 200 °С по стандартной технологии, в результате чего их твердость составила 58 HRC.

Затем осуществляли сравнительные испытания образцов на теплостойкость, нагревая их до температур 200, 225, 250, 275 и 300 °С. Продолжительность нагрева составляла 30 минут, после чего выполнялось измерение твердости.

Результаты испытаний, представленные на рис. 1, убедительно свидетельствуют о положительном влиянии газоимпульсной обработки после закалки стали У8 на ее теплостойкость.

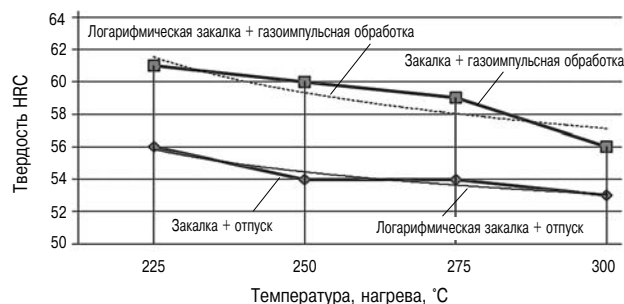


Рис. 1. Влияние газоимпульсной обработки после закалки стали У8 на ее теплостойкость

Повышенная теплостойкость обработанных образцов карбидной фазы может быть объяснена высокой дисперсностью выделяющейся из мартенсита при газоимпульсной обработке, в результате чего их коагуляция и снижение твердости происходили при более высокой температуре.

На следующем этапе осуществлялось исследование влияния газоимпульсной обработки на стойкость готового металлорежущего инструмента, широко применяемого как при изготовлении деталей двигателей, так и при их ремонте, например в случае газотурбинных авиадвигателей, для восстановления отверстий статорных колец после наплавки.

Износ режущей кромки инструмента происходит вследствие совокупности таких факторов, как повреждение режущей кромки, происходящее под действием механических и термических нагрузок, изнашивание вследствие сваривания под давлением инструмента и заготовки (адгезия), механическое изнашивание, представляющее собой отрыв частиц режущей кромки под действием внешних сил, а при значительных температурах и угорание материала режущей кромки (тепловое изнашивание).

Стойкость инструмента обычно оценивается по износу передней и задней поверхности режущей кромки.

Для оценки влияния газоимпульсной обработки на стойкость готового металлорежущего инструмента использовались сверла из легированной инструментальной стали перлитного класса 9ХС диаметром 7,6 мм. Такая сталь обладает повышенной в сравнении с углеродистыми инструментальными сталями теплостойкостью, составляющей 250–260 °С.

Стандартная термическая обработка металлорежущего инструмента из данной стали заключается в закалке в масле с температуры 860–880 °С с последующим низким отпуском при температуре 140–160 °С. Значения теплостойкости после стандартной термообработки представлены в таблице.

Значения теплостойкости стали 9ХС

Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин	Твердость, HRC
150–160	60	63
240–250	60	59

Газоимпульсная обработка готовых сверл осуществлялась воздействием без нагрева на их рабочую часть пульсирующего дозвукового воздушного потока частотой до 1200 Гц и звуковым давлением порядка 130 дБ в течение 20 минут. Сверла при этом размещались вдоль пульсирующего потока, рабочей частью ему навстречу.

Сравнительный анализ стойкости инструмента после газоимпульсной обработки и стандартно обработанного осуществлялся методом сверления пластины из титанового сплава BT14 при одинаковой продолжительности процесса.

В результате износ задней поверхности режущей кромки составил 1,6 мм для обработанного сверла и 2,6 мм для необработанного, то есть более чем в 1,5 раза (1,63) меньше в результате газоимпульсной обработки. Износ передней поверхности режущей кромки (рис. 2) составил 1,5 мм у обработанного сверла против 2,5 мм у необработанного, то есть в 1,67 раза меньше.

Сравнительные данные стойкости инструмента представлены на диаграмме рис. 3.

Повышение стойкости было достигнуто, в основном, за счет инициирования колебаниями газового потока мартенситного превращения остаточного аустенита со снятием остаточных микронапряжений, чем обеспечивается благоприятное расположение дислокаций вокруг карбидных включений.

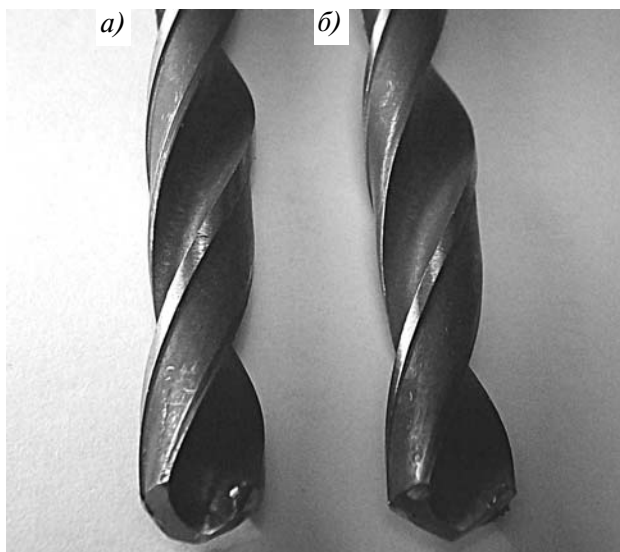


Рис. 2. Износ передней поверхности режущей кромки сверла из 9ХС:

а — необработанного; *б* — обработанного пульсирующим дозвуковым газовым потоком

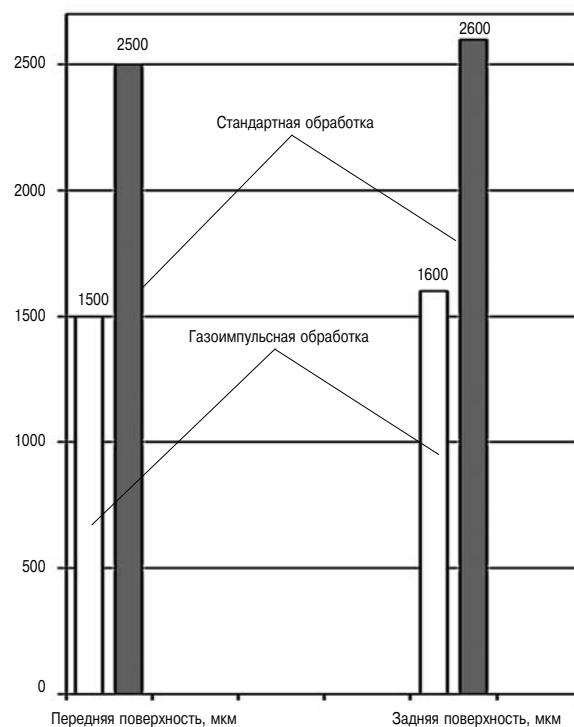


Рис. 3. Сравнительный износ за одинаковый промежуток времени передней и задней поверхностей режущей кромки стандартно термообработанных сверл из инструментальной легированной стали 9ХС диаметром 7,6 мм и сверл, того же материала и диаметра после дополнительной газоимпульсной обработки без нагрева в течение 20 минут

Также исследовалось влияние газоимпульсной обработки на стойкость готового металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, являющейся на сегодняшний день одной из наиболее распространенных легированных сталей для подобного инструмента.

Стандартная упрочняющая термообработка стали Р6М5 заключается в закалке с температуры 1230 °С в машинном масле и последующем двух- и трехкратном отпуске при температуре 570 °С продолжительностью 1 час каждый.

После такой термообработки инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 имеет структуру, представляющую собой смесь отпущенного высоколегированного мартенсита, первичных и вторичных карбидов и некоторого количества остаточного аустенита, что обеспечивает высокую износостойкость и теплостойкость стали.

Газоимпульсная обработка готовых сверл из стали Р6М5 диаметром 9,5 мм осуществлялась по той же технологии, что и в случае стали 9ХС: воздействием без нагрева на их рабочую часть пульсирующего дозвукового воздушного потока в течение 15 минут без использования нагрева изделия. Сверла при этом размещались вдоль пульсирующего потока рабочей частью ему навстречу.

Различие состояло в том, что газоимпульсная обработка осуществлялась на двух режимах. На

первом режиме частота пульсаций воздушного потока составляла 1130 Гц, а звуковое давление достигало 120 дБ благодаря избыточному давлению на входе в генератор 0,5 атмосферы.

Второй режим характеризовался частотой пульсаций 1200 Гц и звуковым давлением до 130 дБ, достигаемым при избыточном давлении на входе в генератор 0,9 атмосферы. На этом режиме существенно возрастает скорость газового потока без значительного роста частоты пульсаций.

Сравнительный анализ стойкости инструмента выполнялся в два этапа. Первоначально многократно сверлили пластину из холоднокатаной листовой среднеуглеродистой стали толщиной 6 мм (по 7 отверстий каждым сверлом), чтобы проверить, сохранится ли эффект газоимпульсной обработки при многократном нагреве режущей кромки. Затем сверлили пластину из титанового сплава ВТ14 толщиной 10 мм (одно отверстие). В результате износ задней поверхности главной режущей кромки у необработанного инструмента составил более 0,5 мм (близко к полному износу). После обдува пульсирующим воздушным потоком при частоте пульсаций 1130 Гц и звуковом давлении до 120 дБ износ составил 0,25 мм и 0,2 мм при частоте пульсаций 1200 Гц и звуковом давлении до 130 дБ (рис. 4, 5).

Таким образом, за счет применения газоимпульсной обработки удалось повысить стойкость готового быстрорежущего инструмента в 2–2,5 раза.

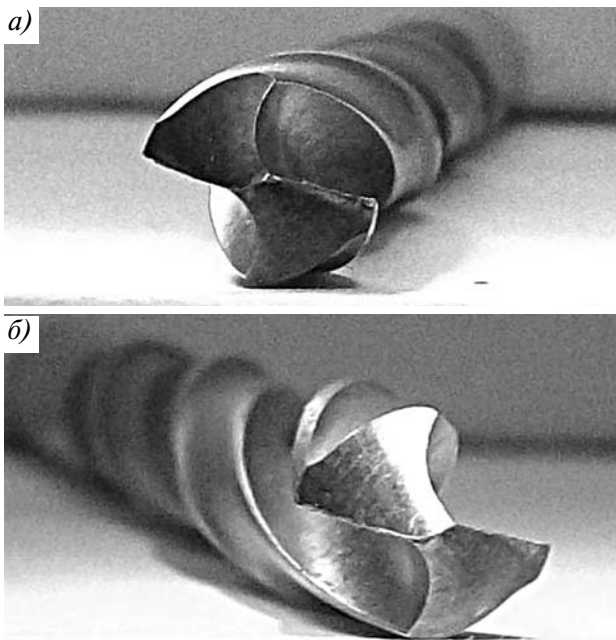


Рис. 4. Износ задней поверхности главной режущей кромки из стали Р6М5:

a — без обработки; *б* — газоимпульсная обработка в течение 15 минут при частоте пульсаций 1200 Гц и звуковом давлении до 130 дБ

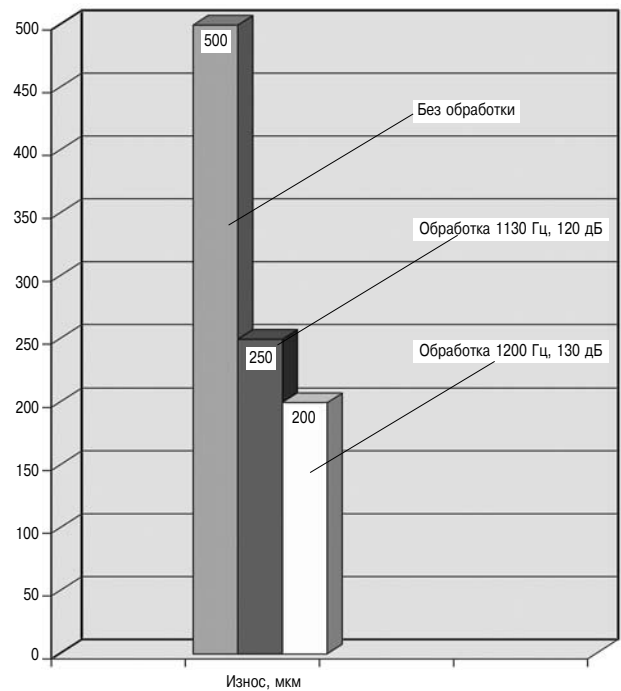


Рис. 5. Сравнительный износ режущей кромки стандартно термообработанных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 и сверл того же материала и диаметра, подвергнутых дополнительной газоимпульсной обработке без нагрева в течение 15 минут при прочих равных условиях

По всей видимости, газоимпульсная обработка позволяет инициировать процессы, соответствующие начальным стадиям распада мартенсита, — выделение из него высокодисперсных карбидных частиц — дисперсионное твердение. Наличие значительного числа мелких карбидных частиц сдвигает процесс коагуляции карбидов, а следовательно и разупрочнение в область более высоких температур. Кроме того, можно предположить, что в ходе описанного воздействия на быстрорежущий инструмент происходит продолжение мартенситного превращения остаточного аустенита.

Таким образом, показано, что газоимпульсная обработка позволяет повысить стойкость металлорежущего инструмента, в том числе готового.

Также испытывались на стойкость к износу машинные полотна по металлу из материала Vi-Metal и полотна по металлу для ножовки из стали У10А после газоимпульсной обработке без использования нагрева. Подобный инструмент при восстановительном ремонте может служить, к примеру, для срезки уголков пера на лопатках вентилятора.

Обдув плоской поверхности полотна пульсирующим воздушным потоком осуществлялся в течение 15 минут при частоте пульсаций порядка 1130 Гц и звуковом давлении до 120 дБ.

В ходе испытания оценивался износ после пропила титановой пластины из ВТ14 толщиной

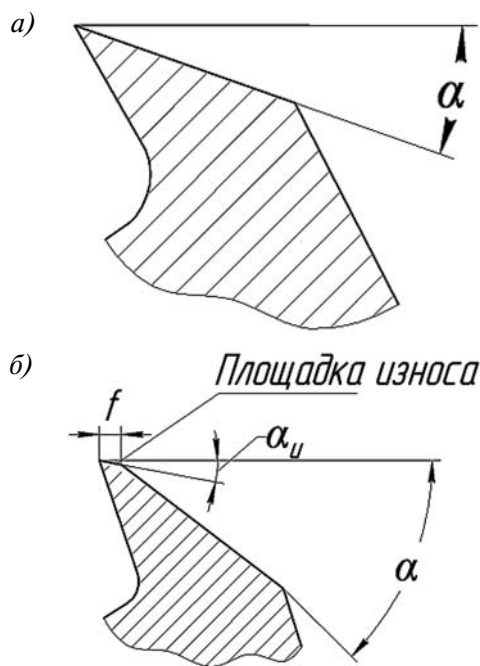


Рис. 6. Измерение износа по задней поверхности:
a — зуб до испытания; *b* — зуб с площадкой износа на задней поверхности

10 мм на глубину 8,5 мм для полотна Vi-Metal и на 4 мм для У10А.

Для определения стойкости использовали метод измерения износа по задней поверхности (рис. 6).

В результате испытаний установлено, что размер площадки износа *f* для обработанного импульсным потоком инструмента из Vi-Metal и У10А составил 0,1 мм, а для необработанного — 0,2 мм или в 2 раза больше (рис. 7).

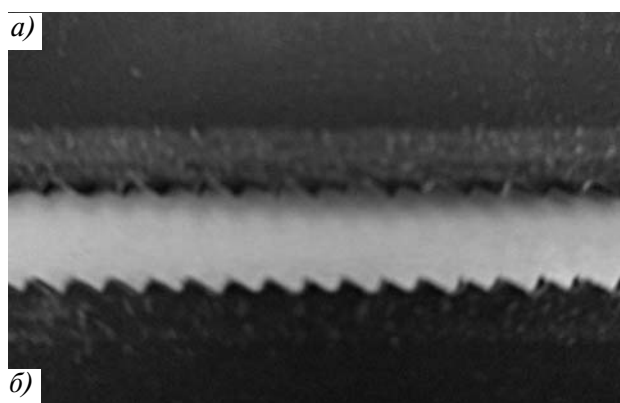


Рис. 7. Полотно для ножовки из стали У10А после испытания:

a — стандартный инструмент; *b* — инструмент, дополнительно обработанный пульсирующим газовым потоком

Обработке пульсирующим воздушным потоком с аналогичными параметрами подвергали в течение 15 минут без нагрева полотно лобзика из стали У10А со стороны плоской поверхности и повернутые под 45 градусов (зубья со стороны натекающего потока). В ходе испытаний пилилась сталь 5Х10Г15СФ2АЦР, при этом толщина листа составляла 1,8 мм, глубина реза 4 мм. Для обработанного полотна *f* составила до 0,1 мм, как при первом, так и при втором варианте положений полотна при обдуве. Величина *f* для необработанного полотна составила 0,2 мм или в 2 раза больше.

Также газоимпульсной обработке подвергалась штамповая сталь 3Х3МЗФ, широко применяющаяся в двигателестроении, как материал для инструмента при операциях обработки давлением.

Термообработка перед газоимпульсной обработкой включала закалку 1040–1080 °С и последующий отпуск при 660 °С. Среднее значение твердости после термообработки составляло 34 HRC. Обдув в установке без нагрева в течение 15 минут осуществлялся при тех же параметрах воздушного потока, что и в предыдущем исследовании. Испытание на теплостойкость осуществлялось при 700 °С. После испытания среднее значение твердости необработанных образцов составило 24 единицы HRC, а у обработанных — 29 HRC, или на 5 единиц больше, что свидетельствует о повышении теплостойкости в результате газоимпульсной обработки.

Газоимпульсная обработка режущего и штампового инструмента из твердых сплавов, таких как ВК8, ВК15, Т15К6, не дала заметного повышения его стойкости, вероятно, потому, что механические волны оказывают воздействие преимущественно на кобальтовую связующую.

Результаты проведенных исследования показали высокую эффективность воздействия пульсирующего газового потока на эксплуатационные свойства инструментальных сталей и в том числе готового инструмента, используемого при изготовлении и восстановительном ремонте деталей двигателей.

Литература

1. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Сочетание закалки сталей с обработкой пульсирующими газовыми потоками // Двигателестроение. — 2015. — № 4. — С. 34–36.
2. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Влияние условий газоимпульсной обработки на механические свойства сталей // Двигателестроение. — 2016. — № 4. — С. 30–34.