

# АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ЗАГОТОВОК С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Киселев Е.С., Ковальнов В.Н. (УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)

*The results of examination of technological efficiency of different ways of diamond smoothing of the ground work-piece are given. It is set, that a reserve of perfecting of technology diamond smoothing is the ultrasonic relaxation of technological residual stresses in a surface layer. Its application allows to obtain major on quantity and on location depth cramping residual stresses even at smaller gain of a hold-down diamond tool.*

Существенным резервом повышения качества и конкурентоспособности продукции современного машиностроения становится инженерия поверхности и поверхностных слоев деталей машин. Это ставит перед технологами и исследователями новые задачи по конструированию свойств поверхностных слоев заготовок, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики деталей, уже в процессе их механической обработки, в особенности на заключительных его операциях, за счет использования тех или иных технологических приемов.

Как известно [1, 2], состояние поверхностного слоя характеризуется целым комплексом показателей физического состояния (структура, субструктура, фазовый состав), химического состава (элементный состав и концентрация элементов в объеме сплава и фаз) и механического состояния (показатели сопротивления деформированию и пластичности, а также технологические остаточные напряжения). Наибольший научный и практический интерес представляют показатели механического состояния, поскольку они, в отличие от показателей физического состояния и химического состава, могут быть математически связаны с технологией не только на эмпирическом, но и на аналитическом уровне с помощью уравнений механики сплошных сред.

Анализ результатов теоретико-экспериментальных исследований механики и термомеханики формирования поверхностных слоев, изложенных в работах [1 – 3] и др., позволяет выявить две принципиально различные и противоположно направленные схемы этого процесса. Первая – деформационное упрочнение – являющаяся следствием доминирования силового фактора, сопровождается увеличением в поверхностном слое показателей сопротивления деформированию (микротвердости и пределов упругости, текучести, прочности) с одновременным уменьшением запаса пластичности. Вторая – разупрочнение – происходит при доминировании теплового фактора и приводит к уменьшению показателей сопротивления деформированию при одновременном увеличении запаса пластичности поверхностного слоя.

Высокопроизводительная реализация каждой из этих схем по отдельности не обеспечивает эксплуатационных свойств детали. Так, форсирование производительности операций поверхностного пластического деформирования (реализующих первую схему) неизбежно приводит к «перенаклепу» поверхности, т.е. разрушению поверхностного слоя за счет исчерпания запаса пластичности уже в процессе обработки, несмотря на обеспечиваемые высокие значения показателей сопротивления деформированию. Высокоскоростное резание (в особенности, шлифование), реализующее вторую схему, напротив, увеличивает запас пластичности поверхностного слоя, однако вследствие уменьшения пределов упругости, текучести и прочности сформированный при такой схеме поверхностный слой разрушается даже при незначительных эксплуатационных нагрузках.

Таким образом, высокопроизводительный технологический процесс, обеспечивающий возможность направленного формирования поверхностных слоев деталей, неизбежно должен сочетать операции как теплового, так и силового воздействия на поверхностный слой заготовки (либо комбинированные операции), а выявление рациональных комбинаций и режимов каждого из воздействий с точки зрения эксплуатационных свойств деталей является актуальной проблемой современного машиностроения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования технологической эффективности различных методов алмазного выглаживания шлифованных заготовок. В качестве критерия эффективности были выбраны технологические остаточные напряжения в поверхностном слое, которые занимают особое место внутри группы показателей механического состояния, являясь комплексной характеристикой как сопротивления деформированию, так и пластичности.

Измерение остаточных напряжений проводили неразрушающим методом с помощью измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ [4], который обеспечивает возможность построения эпюр остаточных напряжений с точностью до 10 МПа по результатам сканирования удельной электрической проводимости поверхностного слоя детали на 16 глубинах от 5 до 500 мкм.

Исследование проводили на экспериментальной установке, созданной на базе токарного станка УТ-16 и оснащенной тензометрической аппаратурой, аппаратурой для измерения контактных температур и оригинальным устройством для ультразвуковой релаксации остаточных напряжений контактным способом [5]. Конструкция устройства для алмазного выглаживания показана на рис. 1, а некоторые результаты исследований – на рис. 2.

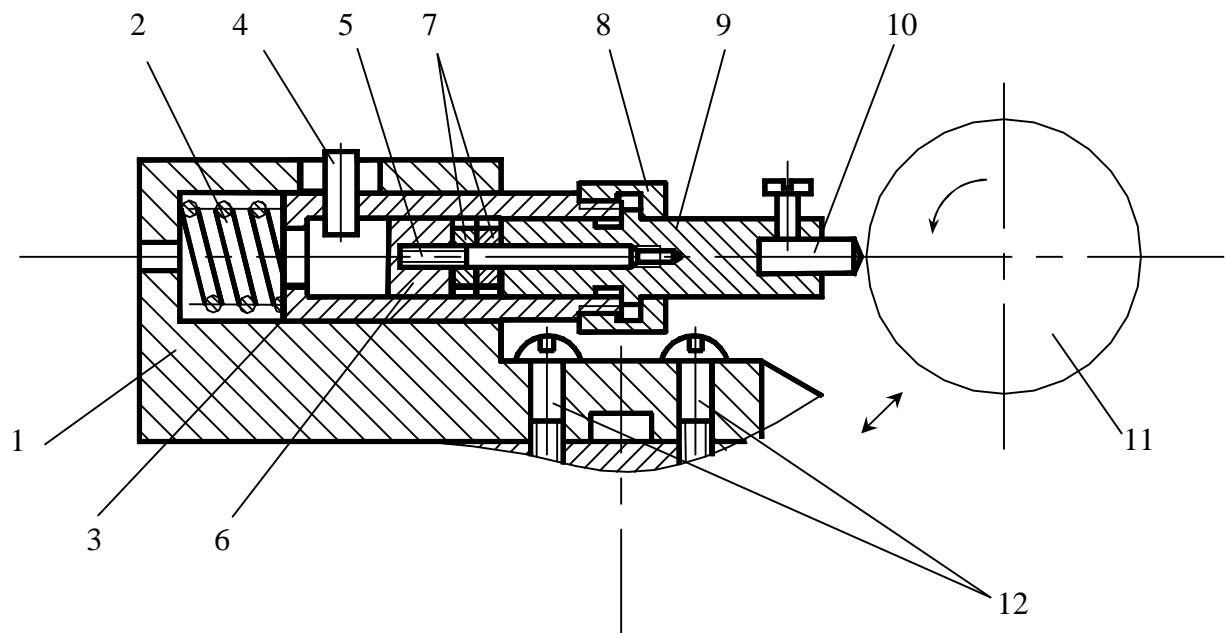


Рис. 1. Устройство для алмазного выглаживания заготовок с наложением ультразвуковых колебаний: 1 – корпус; 2 – пружина; 3 – стакан; 4 – штифт; 5 – шпилька; 6 – гайка; 7 – пьезокерамические кольца; 8 – гайка; 9 – волновод; 10 – алмазный выглаживатель; 11 – заготовка; 12 – винты

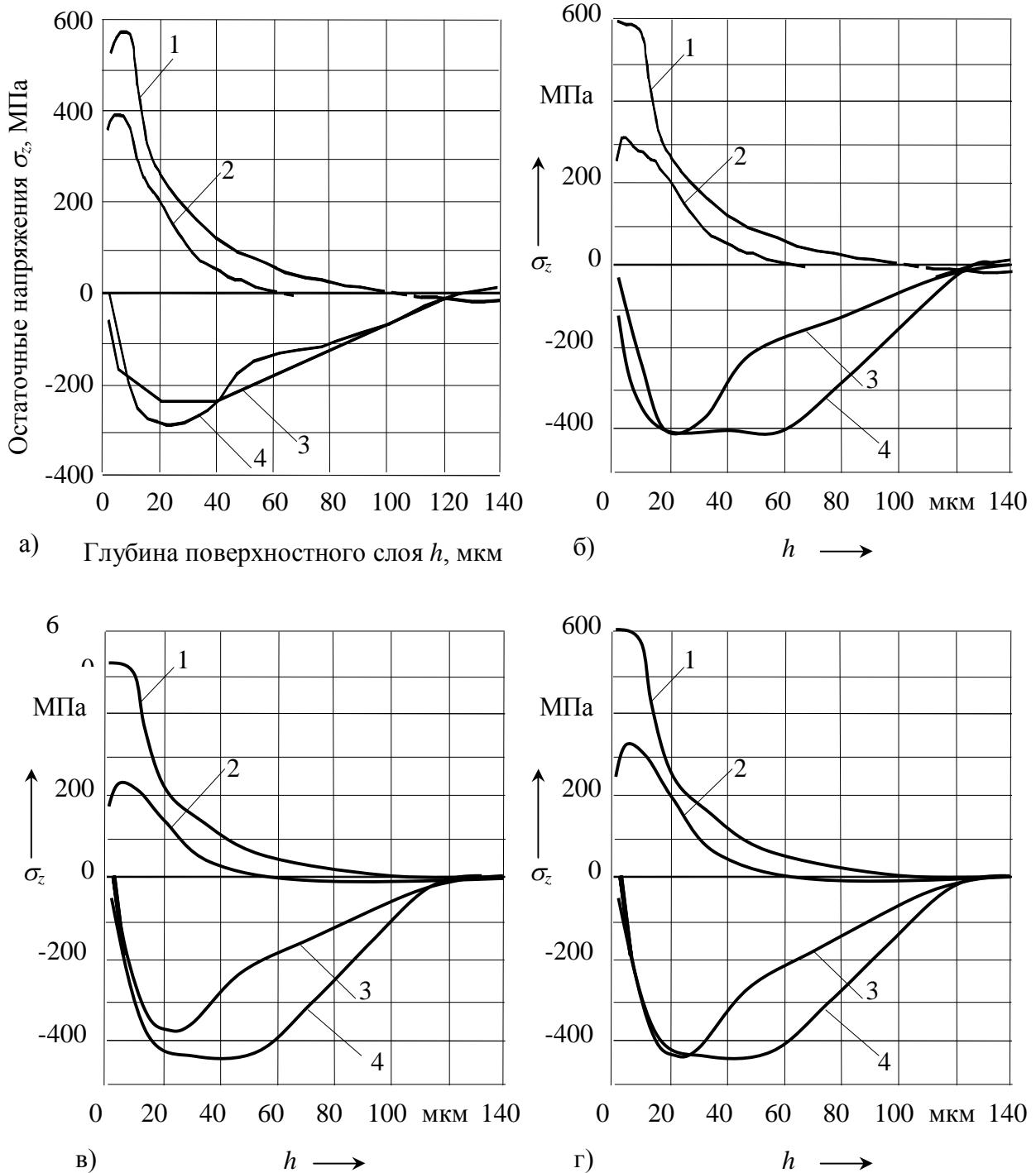


Рис. 2. Распределение технологических остаточных напряжений  $\sigma_z$  по глубине  $h$  поверхностного слоя заготовок из сталей Р18 (а), 40Х (б) 3Х3М3Ф (в) и 95Х18 (г) при различных технологиях обработки: 1 – шлифование; 2 – шлифование с последующей ультразвуковой релаксацией остаточных напряжений; 3 – шлифование с последующим алмазным выглаживанием с усилием прижима выглаживателя 200 Н; 4 – шлифование, ультразвуковая релаксация остаточных напряжений и алмазное выглаживание с усилием прижима выглаживателя 180 Н

Исследования выполнены на образцах из коррозионностойкой подшипниковой стали 95Х18 (НВ 180...220), инструментальной штамповой стали 3Х3М3Ф (НВ 160...260), быстрорежущей стали Р18 (НВ 180...200) и конструкционной легированной стали 40Х (НВ 160...180), широко применяемой в автомобилестроении для изготовления валов, валов-шестерен, коленчатых и кулачковых валов. Помимо того, что к поверхностным слоям деталей из выбранных материалов предъявляют особые требования в связи с условиями их эксплуатации, физико-механические свойства этих материалов варьируются в достаточно широких диапазонах.

Наряду с технологическими остаточными напряжениями в исследованиях контролировали также составляющие силы алмазного выглаживания, контактную температуру, элементы режима обработки и шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra.

Все образцы подготавливали, шлифуя их на круглошлифовальном станке ЗБ161 (режим шлифования: рабочая скорость круга 24А16НС17К11 – 35 м/с, окружная скорость заготовки – 35 м/мин, скорость продольной подачи – 0,6 м/мин, врезная подача – 0,01 мм/дв.ход; расход СОЖ (2 %-й раствор Синхо-2М) – 10 дм<sup>3</sup>/мин). Далее половину образцов направляли на ультразвуковую релаксацию остаточных напряжений и затем на операцию алмазного выглаживания, а другую половину образцов выглаживали без предварительной релаксации напряжений.

Режим ультразвуковой релаксации: продолжительность – 3 минуты, максимальная амплитуда колебаний волновода – 5 мкм, частота – 18,6 кГц.

Режим алмазного выглаживания: алмазный выглаживатель ИС-290.00.04, окружная скорость заготовки 37 м/мин, скорость продольной подачи – 0,064 м/мин, усилием прижима выглаживателя варьировали за счет поджатия пружины 2 устройства (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, в поверхностном слое заготовок после шлифования (кривые 1) формируются значительные растягивающие остаточные напряжения, что подтверждает доминирование теплового фактора в этом процессе. Такой характер эпюра остаточных напряжений нежелателен с точки зрения усталостной прочности, коррозионной стойкости и износостойкости поверхностного слоя.

Для улучшения этих характеристик в поверхностном слое необходимо формировать сжимающие остаточные напряжения, например, за счет силового воздействия выглаживателем (кривые 3 и 4). При этом, очевидно, чем больше величина растягивающих напряжений в поверхностном слое заготовки после шлифования, тем с большей силой необходимо воздействовать на поверхностный слой в процессе выглаживания, чтобы обеспечить одинаковой уровень остаточных напряжений на выходе. Однако значительное силовое воздействие на заготовку зачастую (особенно в случае маложестких прецизионных деталей) может оказаться неприемлемым. Кроме того, учитывая особые физико-механические свойства алмаза и их температурную зависимость, алмазное выглаживание следует выполнять в достаточно мягком температурно-силовом режиме. В этих случаях перед выглаживанием растягивающие остаточные напряжения целесообразно снизить, например, за счет ультразвуковой их релаксации (кривые 2).

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований показал, что предварительная релаксация остаточных напряжений позволяет на 15 – 20 % уменьшить силовую напряженность алмазного выглаживания. При этом на последующей операции алмазного выглаживания формируются наибольшие по

величине и по глубине залегания сжимающие растягивающие напряжения даже при меньшем усилии прижима алмазного выглаживателя (см. кривые 3 и 4).

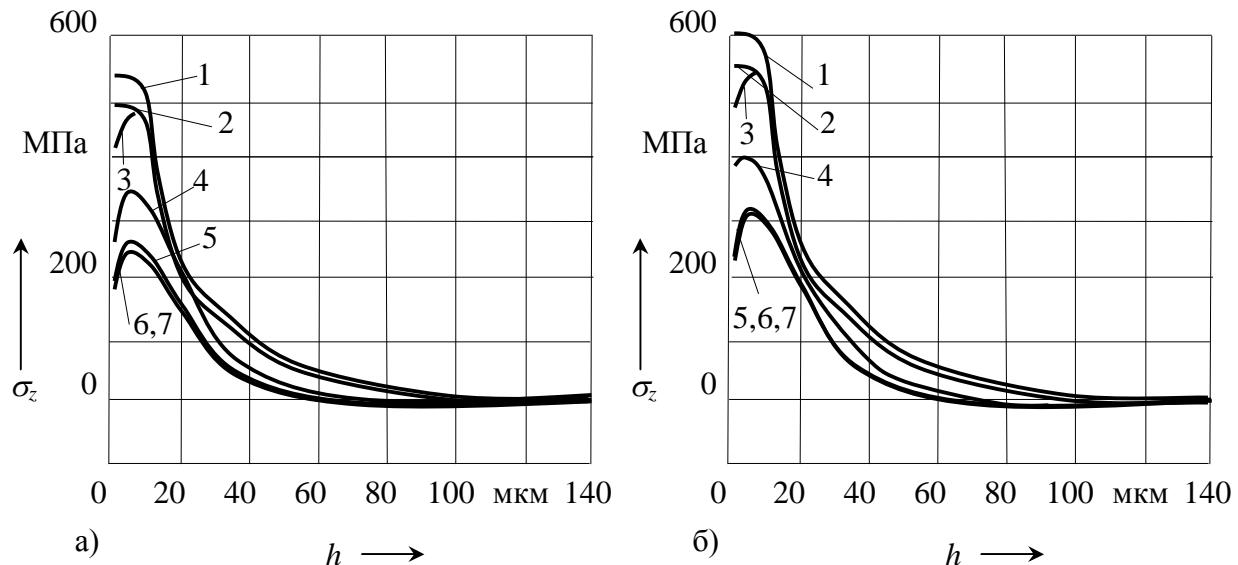


Рис. 3. Влияние времени релаксации и усилия прижима волновода на распределение технологических остаточных напряжений  $\sigma_z$  в поверхностном слое заготовок из сталей 3Х3М3Ф (а) и 95Х18 (б): 1 – после шлифования; 2, 3 – после ультразвуковой релаксации в течение 1 мин.; 4, 5 – то же 3 мин.; 6, 7 – то же 8 мин.; 2, 4, 6 – усилие прижима волновода 5 Н; 3, 5, 7 – усилие прижима волновода 90 Н

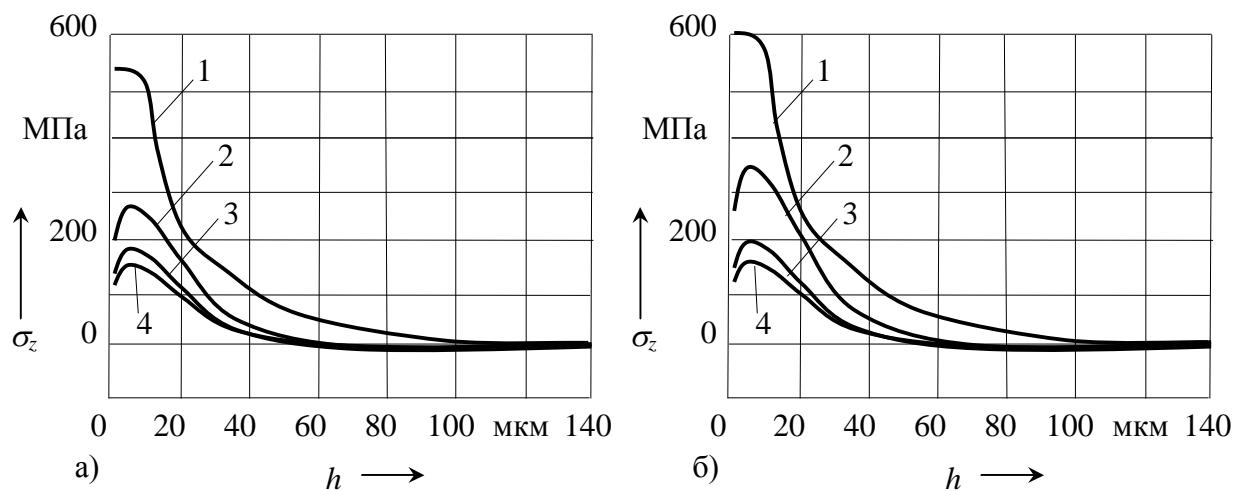


Рис. 4. Влияние формы ультразвуковых колебаний распределение технологических остаточных напряжений  $\sigma_z$  в поверхностном слое заготовок из сталей 3Х3М3Ф (а) и 95Х18 (б): 1 – после шлифования; 2 – после шлифования и ультразвуковой релаксации остаточных напряжений с использованием синусоидальных колебаний; 3 – то же с использованием амплитудно-модулированных колебаний; 4 – то же с использованием частотно-модулированных колебаний.

На втором этапе исследований выявляли рациональные параметры ультразвуковых колебаний, сообщаемых заготовке для релаксации остаточных напряжений, и режима ультразвуковой релаксации с целью повышения эффективности этого процесса (рис. 3, 4).

Ультразвуковая релаксация с использованием синусоидальных колебаний обеспечила снижение остаточных напряжений до 2,5 раз (кривые 5, 6, 7 на рис. 3). При этом отмечено, что с увеличением продолжительности релаксации, уровень остаточных напряжений уменьшается, однако интенсивность этого уменьшения не одинакова. На первой минуте ее величина максимальна и составляет около 100 МПа/мин, к восьмой минуте она снижается практически до нуля, а остаточные напряжения стабилизируются на определенном уровне – около 250...300 МПа на глубине 5 мкм, поэтому релаксация продолжительностью более 8 минут нецелесообразна. Приложение к волноводу усилия способствует интенсификации снижения остаточных напряжений и более ранней их стабилизации: так, если при усилии прижима 5 Н стабилизация остаточных напряжений зафиксирована на 8 минуте (кривая 6), то при 90 Н – уже на 3 минуте (кривая 5). Отмеченные особенности формирования остаточных напряжений при шлифовании и ультразвуковой релаксации характерны и для других исследованных материалов.

Анализ априорной информации, касающейся механизмов снятия остаточных напряжений за счет ультразвукового воздействия на поверхностный слой, показал, что энергия ультразвуковой волны поглощается дислокациями и преобразуется в энергию перемещения этих дислокаций [6], вызывая развитие внутризерновых деформаций, что способствует пластическим сдвигам, уменьшающим остаточные напряжения. При этом установлено, что частотная зависимость дислокационного поглощения энергии ультразвука имеет резонансный характер, а собственная резонансная частота дислокации определяется длиной дислокационного отрезка [6].

Последнее свидетельствует о том, что ультразвуковые колебания фиксированной частоты воздействуют лишь на дислокационные отрезки определенной длины, а для вовлечения в процессы дислокационного поглощения и перемещения дислокационных отрезков разной длины необходимо изменять частоту ультразвуковых колебаний. На практике это может быть реализовано путем использования модулированных ультразвуковых колебаний. Модуляция ультразвуковых колебаний по амплитуде или частоте, за счет расширения полосы частот, занимаемой модулированным колебанием, способствует вовлечению в процесс перемещения дислокаций в более широком диапазоне длин. Тем самым, интенсифицируются пластические сдвиги и релаксация технологических остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Это предположение полностью подтверждают результаты исследований, представленные на рис. 4.

Таким образом, ультразвуковая релаксация остаточных напряжений является важным резервом технологического обеспечения качества деталей машин.

**Список литературы:** 1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с. 2. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 252 с. 3. Васин С.А. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учеб. для техн. вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с. 4. Иванов С.Ю. Измерительно-вычислительный комплекс скан-идентификации технологических

остаточных напряжений / С.Ю. Иванов, В.И. Прима // Тяжелое машиностроение, 1995. – № 12. – С. 14 – 17. 5. Киселев Е.С. Новые методы ультразвуковой стабилизации остаточных напряжений в прецизионных шлифованных деталях технологических машин / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальников, А.А. Норкин // Сб. трудов VII МНТК «Динамика технологических систем – 2004». – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 192 – 195. 6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

Сдано в редакцию 31.05.05  
Рекомендовано д.т.н., проф. Прутяну О.

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ ШИХТ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЗАСКЛАДИРОВАННЫХ ШЛАМОВ

**Клягин Г.С., Ростовский В.И., Пономарева Я.Ю. (ДонНТУ, Донецк, Украина)**

*Circuit of preparation of charges on sinter plants are investigated, alternatives of their perfection by installation of the chain rotary desintegrating-blending machine in technological streams for raise of efficiency of metallurgical dusts and slurries utilization are offered. The opportunity of pelletizing ferruginous waste products before their use in agglomeration is investigated.*

Производство металлургической продукции сопровождается образованием значительного количества железосодержащих отходов, которые из-за отсутствия простых и экономически выгодных технологий подготовки к утилизации остаются невостребованными и зачастую просто складируются. Заскладированные отходы, с одной стороны составляют крупные потери минерального сырья и, с другой стороны, наносят ущерб окружающей среде. Только на таких крупных металлургических предприятиях Украины как «Криворожсталь», им. Дзержинского и им. Ильича накоплено более 10 млн.т шламов. В настоящее время приоритетным направлением утилизации железосодержащих отходов, как текущего производства, так и заскладированных, является их добавка к агломерационной шихте.

Одним из критериев пригодности железосодержащих шламов к утилизации является возможность их равномерного распределения в объеме исходной шихты. Анализ работ, посвященных вопросам утилизации железосодержащих шламов в аглопроизводстве [1-4], показал, что равномерное распределение шламов в шихте достигается либо путем распыления шламов в смесителях или окомкователях шихты, либо путем предварительного смешивания шламов с сухими отходами или известью с последующей добавкой их в шихту.

Эти способы приемлемы для железосодержащих шламов текущего производства, но малоэффективны для заскладированных шламов. В шламонакопителях шламы слеживаются, поверхность их высыхает, а в зимнее время они смерзаются; в них образуются прочные комки, которые проходят линию технологического оборудования аглофабрик, практически не разрушаясь. В результате, из-за неудовлетворительной работы трактов шихтоподготовки шихта, содержащая заскладированные железосодержащие шламы, не обладает достаточной