

НОВЫЙ МЕТОД ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

В.А. Грачёв, А.А. Голубев, Ю.А. Гудим

Центр глобальной экологии факультета глобальных процессов МГУ им. М.В. Ломоносова, Промышленная компания "Технология металлов", г. Челябинск

Разработан и запатентован способ термической переработки (ТО) твердых коммунальных отходов (ТКО) и агрегат "Магма" для его реализации. Описана конструкция и способ ТО ТКО. Приведены результаты испытаний ТО ТКО на различных видах отходов. Установлено, что в разработанной печи можно перерабатывать все виды отходов, превращая их либо в электроэнергию и газ, который после эффективной очистки выбрасывается в атмосферу, либо в шлак, который может быть использован при строительстве дорог.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы (ТКО), термическая переработка (ТО), шахтная печь, очистка газов

Development and Testing of a New Method for the Thermal Processing of Industrial and Consumer Waste

V.A. Grachev, A.A. Golubev, Yu.A. Gudim

Center for Global Ecology, Faculty of Global Processes, Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia, LLC Industrial company "Technology of metals", 454090 Chelyabinsk, Russia

A method for the thermal processing of solid municipal waste (SMW) and the Magma unit for its implementation has been developed and patented. The article describes the construction and the method of SMW thermal processing. The results of SMW thermal processing tests on various types of waste are given. It is established that in the developed furnace it is possible to process all types of waste, turning them into either electricity or gas, which after effective purification is released into the atmosphere or into slag that can be used in the construction of roads.

Key words: solid municipal waste (SMW), thermal processing, shaft furnace, gas cleaning

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-14-18

Отходы и загрязнение нашей планеты становятся главной и глобальной экологической проблемой, которая несет в себе потенциальную опасность для здоровья людей, а также для окружающей природной среды.

Организация упорядоченного обращения отходов производства и потребления, т.е. их сбора, удаления, обезвреживания, переработки, использования, уничтожения и т.п., в последние годы превратилась в одну из наиболее острых экологических проблем всего мира.

В Северной Америке на одного жителя приходится 1,6 кг мусора в сутки; в Европе —

1,5; в СНГ — 1,2; в Азии — 0,4; в Океании — 0,8; в Латинской Америке — 0,6; в Африке — 0,5 кг.

В последние годы проблема отходов стала глобальной и особенно серьезной для России.

В Москве и области проблема стоит очень остро из-за высокой плотности населения: здесь живет более 19,8 млн человек, которые ежегодно производят 11 млн т твердых коммунальных отходов (ТКО). Полигоны, на которые с советских времен свозился весь этот мусор, сейчас уже переполнены. Если учесть, что на одну легальную свалку приходится две нелегальные, сложившаяся

ситуация грозит экологической катастрофой.

Комплексное решение данной проблемы включает сбор, сортировку, повторное использование, уничтожение и захоронение.

Авторами разработан и запатентован способ термической переработки ТКО [1]. Новый метод основан на использовании агрегата "Магма" [2].

В настоящее время существуют отдельные технологии по переработке отходов. Например, металлы перерабатывают в детали, а алюминий идет на изготовление различных материалов, причем затраты энергии заметно ниже (на

80–90 %), чем при получении алюминия из руды. Текстильные отходы измельчаются и используются для придания прочности бумажной продукции, а старые покрышки — для изготовления резиновых изделий; пластмассу "перерабатывают" в синтетическую древесину, стекло дробят и готовят новые товары; мусор и пищевые отходы идут на приготовление компостов.

В России под полигоны ТКО занято 4 млн га земли, 64 государства в мире имеют площадь меньше, чем у нас занято под свалки. Тайвань площадью 35 980 км² (3,6 млн га) является мировым лидером по переработке отходов. Доля перерабатываемых отходов в Тайване составляет 55 %. В Московском регионе только 5 % подвергается переработке и 95 % — захоронению. В странах Европы в среднем около половины отходов подвергается захоронению.

Цель данной работы — разработка способа термической переработки ТКО и его испытание на моделирующих установках.

Задачи исследования:

- разработка способа термической переработки ТКО, кардинально решающего возможность получения безопасных компонентов;
- испытание предлагаемого способа для переработки различных видов ТКО.

Принципиальная схема опытной плавильной установки испытана на металлических радиоактивных отходах [2].

Сжигание ТКО при высоких температурах в опытно-промышленных масштабах в данной работе проводили:

- в печи Ванюкова при температуре порядка 1400 °С на поверхности и в слое барботируемого шлака [3, 4];
- в агрегате Ромелт на поверхности и в слое расплавленного шлака при температуре 1600 °С [5];
- в плазменных печах небольшой производительности при максимальных температу-

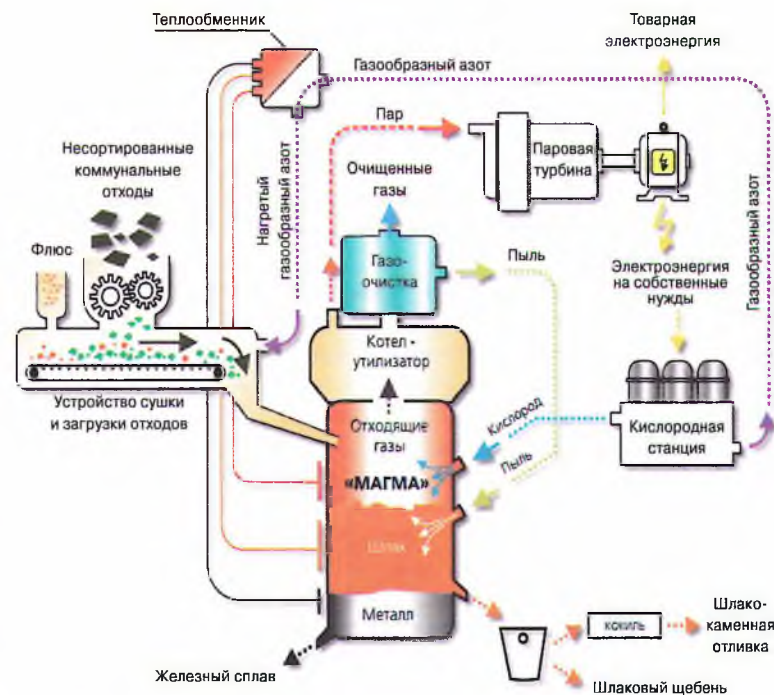


Схема агрегата для термической переработки отходов
Scheme of the unit for thermal processing of waste

рах рабочего пространства до 2500 °С [6].

Разработанный авторами плавильный агрегат "Магма" представлен на рисунке.

Характерной особенностью агрегата является жидкометаллическое охлаждение корпуса шахтной печи.

Термическая переработка обычных ТКО в экспериментальных установках показала полное отсутствие продуктов неполного сгорания ТКО, включая диоксины и фураны, в отходящих из установок газах. Одна из причин этого — резкое увеличение скорости химических реакций при повышении температуры. По данным [7] время полной деструкции диоксинов при температуре 1000 °С составляет 2 с, при 1700 °С — $5 \cdot 10^{-4}$ с.

С целью определения возможности безопасного использования шлаков, получаемых при утилизации ТКО по предлагаемой технологии, в 2007 г. нами было проведено изучение состава, свойств и скорости вымывания тяжелых металлов из таких шлаков.

Типичные ТКО, отобранные из контейнеров для мусора в г. Челябинске, сжигали на

слое предварительно расплавленного кислого шлака в лабораторных и полупромышленных условиях (печь Таммана, установка электрошлакового перепада с тиглем вместимостью 100 кг по металлу). Полученные шлаки дробили, смешивали и проводили химический анализ ("мокрым" способом) проб шлака.

Среднее содержание оксидов в шлаке составляло, % по массе: SiO_2 — 60,3; CaO — 12,3; Al_2O_3 — 14,3; MgO — 0,85; ΣFeO — 8,87; NiO — 0,04; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ — 2,72.

В усредненных образцах шлака атомно-абсорбционным методом определяли содержание тяжелых металлов в пересчете на их оксиды. Оно изменялось в следующих пределах, % по массе: Cr_2O_3 — 0,018–0,020; MnO — 0,101–0,105; ZnO — 0,026–0,028; PbO — 0,016–0,017; TiO_2 — 0,087–0,090; CuO — 0,010–0,012; V_2O_5 — 0,009–0,012.

Видно, что содержание тяжелых металлов в исследуемых шлаках невелико и не превышает их содержание в золошлаковых отходах действующих мусоросжигающих заводов.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в порошках с частицами разного размера, мг/л

Table 1. The content of heavy metals in powders with particles of different sizes, mg/L

Размер частиц, мм	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
0,5–3,0	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0	0	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	0	0	$5,3 \cdot 10^{-3}$
До 0,5	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Сводный материальный баланс переработки отходов

Table 2. The consolidated material balance of recycling

Статья	Продукты	Значения	
		кг/т	%
Приход	Отходы	1000	13,0
	Кислород	552	7,2
	Азот	1756	22,8
	Воздух	4400	57,1
	Адсорбент	1	0,01
	Итого	7709	100
Расход	Металл	22,0	0,3
	Шлак	172,3	2,2
	Отходящий газ	7506	97,4
	Пыль	8,8	0,1
	Итого	7709	100

Как известно, кислые шлаки обладают высокой прочностью и твердостью, а также практически не разрушаются под воздействием атмосферной влаги. Это подтверждают результаты проведенных нами экспериментов со шлаками, полученными при сжигании ТКО.

Образцы шлака измельчили до получения фракций с частицами размером до 0,5 мм и 0,5–3,0 мм. Полученные порошки заливали дистиллированной водой и выдерживали в

ней семь календарных дней. После окончания выдержки определяли содержание тяжелых металлов в воде методом атомно-эмиссионного анализа в лаборатории Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Средние результаты, полученные при определении содержания тяжелых металлов, представлены в табл. 1.

Из приведенных данных видно, что вымывания тяжелых металлов из шлака практически не происходит. Поэтому

щебень из кислого шлака, полученного при высокотемпературной утилизации ТКО по предлагаемой технологии, вполне пригоден для использования в строительстве без каких-либо ограничений.

Испытания такого щебня, выполненные в научно-исследовательском институте строительных материалов (НИИ-СТРОМ, г. Челябинск), показали, что щебень из шлака, полученного при утилизации ТКО, по служебным свойствам не уступает гранитному щебню.

С целью определения экономической и экологической целесообразности применения предлагаемой технологии высокотемпературной утилизации ТКО выполнили расчеты материального и теплового баланса процесса утилизации ТКО.

Расчет проводили, исходя из среднего для России состава ТКО [8–12], совпадающего со средним составом ТКО г. Челябинска.

Для анализа химических процессов, протекающих при сжигании ТКО, применен многокомпонентный термодинамический анализ (МТА). Расчеты проводили поэтапно для всех модулей агрегата.

Сводный материальный баланс переработки ТКО в агрегате приведен в табл. 2, сводный тепловой баланс этого процесса — в табл. 3, состав отходящего из трубы очистных сооружений газа — в табл. 4.

Составы уловленной пыли приведены в табл. 5 и 6.

Данные, приведенные в табл. 2–6, свидетельствуют о высокой технико-экономической и экологической эффективности предлагаемой технологии утилизации ТКО.

Основные достоинства предлагаемой технологии:

- сжигание и частичная газификация ТКО на поверхности большого объема расплавленного шлака, нагретого до температур 1550–1600 °С, обеспечивающие так называемый "термический удар" — очень быстрый нагрев загружаемых

Таблица 3. Сводный тепловой баланс переработки отходов

Table 3. The consolidated heat balance of waste processing

Статья	Тепловой поток	Значения		
		Гкал/ч	МВт	%
Приход	Химическое тепло отходов	107,5	125,0	100
	Физическое тепло металла	0,23	0,26	0,2
	Физическое тепло шлака	2,98	3,47	2,8
	Тепло на выработку пара:			
	в газовом котле-утилизаторе	78,7	91,45	73,2
	в воздушном котле-утилизаторе	14,6	16,91	13,5
Итого на выработку пара	93,3	108,4	86,7	
Расход	Тепловые потери:			
	камеры охлаждения газа	0,38	0,44	0,4
	теплообменника	0,38	0,45	0,4
	газового котла-утилизатора	2,58	3,00	2,4
	воздушного котла-утилизатора	0,52	0,61	0,5
	системы газоочистки с отходящим газом	7,21	8,38	6,7
	Итого расхода	107,5	125,0	100

Таблица 4. Химический состав отходящего газа*

Table 4. The chemical composition of the exhaust gas *

Компоненты	Содержание									
	В газе		В воздухе		Σ					
	кг/т	нм ³ /т	кг/т	нм ³ /т	кг/т	нм ³ /т	% по массе	об. %	мг/нм ³	
									фактическое	нормированное
N ₂	3147	2518	2000	1600,26	5148	4118	68,6	69,6	–	–
CO ₂	1102	561	–	–	1102	561	14,7	9,5	–	–
H ₂ O	632	786	26	32,7	658	819	8,8	13,8	–	–
O ₂	–	–	599	419,0	599	419	8,0	7,1	–	–
HF	2·10 ⁻⁰⁶	–	–	–	2·10 ⁻⁰⁶	–	–	–	3·10 ⁻⁰⁴	1
HCl	1·10 ⁻⁰⁸	–	–	–	1·10 ⁻⁰⁸	–	–	–	2·10 ⁻⁰⁶	10
SO ₂	0	–	–	–	0	–	–	–	0	50
Cd	0	–	–	–	0	–	–	–	0	0,05
Пыль	0,0222	–	–	–	0,0222	–	–	–	3,7	30
в том числе CdS	0,00001	–	–	–	0,00001	–	–	–	0,002	0,05
Итого	4880	3865	2625	2052	7506	5917	100	100	–	–

*При 70°C.

ТКО до температур выше 700 °С, исключая возможность образования диоксинов в наиболее опасном интервале температур 180–700 °С;

- сжигание или газифицирование ТКО в атмосфере кислорода, обеспечивающие высокую температуру (не менее 1700 °С) свободного пространства и, соответственно, высокую температуру газовой фазы, позволяющие исключить образование продуктов неполного сгорания ТКО, в том числе диоксинов, или осуществить полное их разложение;

- расплавление минеральной составляющей ТКО, получение жидкого перегретого шлака, при необходимости корректировка состава шлака присадками флюса и обеспечение возможности безопасного и эффективного использования такого шлака в строительстве;

- небольшое количество пыли, которую, возможно, придется захоранивать;

- получение шихтовых слитков черного металла из металлических отходов, содержащихся в ТКО;

- фиксация подавляющего количества тяжелых металлов в получаемых шлаке и шихтовых слитках;

- получение при переработке ТКО значительного количества товарных продуктов (металл, шлак, электроэнергия,

тепловая энергия) для реализации на рынке.

Предложенный способ термической переработки отходов может быть применен для всех видов отходов. Испытания способа показали, что использование новой системы охлаждения корпуса плавильной камеры и ряд других конструктивных решений позволяют надёжно повысить рабочую температуру процесса и, тем самым, значительно увеличить производительность агрегата. Высокотемпературная переработка ТКО, в свою очередь, позволяет минеральную массу отходов обрабатывать в товарную продукцию. Выработанная агрегатом электроэнергия покрывает расходы на производство кислорода и технологические нужды, является товарной продукцией и продаётся на сторону.

Принятый режим сжигания отходов с минимальным избытком воздуха исключает поступление оксидов азота в отходящий газ и затрудняет образование в газе свободного хлора. Ранняя высокотемпературная нейтрализация отходящего газа полностью предотвращает опасность вторичного диоксинообразования, а двухступенчатая низкотемпературная сухая очистка газа позволит снизить его загрязнённость до уровня, полностью соответствующего действующим нормативам.

Таблица 5. Компонентный состав уловленной пыли

Table 5. The component composition of the collected dust

Компоненты	Содержание	
	кг/т	%
NaCl	3,6188	40,93
Na ₂ SO ₄	3,4286	38,78
Fe ₂ O ₃	0,8437	9,54
ZnO	0,6194	7,01
SiO ₂	0,1658	1,88
CdS	0,0044	0,05
NaF	0,1219	1,38
CaF ₂	0,0098	0,11
Na ₂ CO ₃	0,0293	0,33
Итого	8,842	100

Таблица 6. Элементный состав уловленной пыли

Table 6. Elemental composition of collected dust

Элементы	Содержание	
	кг/т	%
Na	2,6129	29,55
Fe	0,5906	6,68
Si	0,0774	0,88
Ca	0,0050	0,06
Zn	0,4976	5,63
S	0,7736	8,75
Cl	2,1960	24,84
F	0,0599	0,68
Cd	0,0034	0,04
C	0,0033	0,04
O	2,0218	22,87
Итого	8,842	100

Литература

1. Голубев А.А., Гудим Ю.А., Грачев В.А., Дыдычкин В.П. Способ безотходной термической переработки твердых коммунальных отходов и агрегат для его осуществления. Патент РФ 2 461 776. Дата подачи 20.06.2010, дата публикации 20.09.2012. Федеральный институт промышленной собственности. Официальный бюллетень "Изобретения. Полезные модели". 2012. № 26. С. 1–16.
2. Гудим Ю.А., Голубев А.А., Грачев В.А. Одностадийная пирометаллургическая переработка металлических радиоактивных отходов. Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 5. С. 4–9.
3. Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д. и др. Плавка в жидкой ванне. Под ред. А.В. Ванюкова. М., Metallurgiya, 1988. 208 с.
4. Мечев В.В., Гречко А.В., Денисов В.Ф. и др. Полупромышленная переработка бытовых отходов в печи Ванюкова. Цветная металлургия. 1993. № 1. С. 26–27.
5. Процесс Ромелт. Под ред. А.В. Роменца. М., ИД Руда и металлы, 2005. 400 с.
6. Рутберг Ф. Вытаскиваем всю энергию, которая содержится в веществе. Ежедневная электронная газета Файл-РФ. 17 июня 2011. [Электронный ресурс]. URL: <http://file-rf.ru/analytics/168> (дата обращения ???).
7. Addink R., Olie K. Mechanisms of formation and destruction of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in heterogeneous systems. *Environmental Science and Technology*. 1995. V. 29. № 6. P. 1425–1435. DOI: 10.1021/es00006a002
8. Кабанова Т.С., Зайцев В.А., Ягодин Г.А. Экологические проблемы термической переработки твердых бытовых отходов. Экология и промышленность России. 2010. Февраль. С. 47–49.
9. Ашпина О. Дорогой наш ТБО. *The Chemical Journal*. 2010. № 8. С. 27–31.
10. Калинин В.И. Научно-технические основы термической утилизации твердых бытовых отходов. Научно-исследовательский институт строительных материалов и композитов. 2002. [Электронный ресурс]. URL: www.stromkomposit.ru/42.html (дата обращения ???).
11. Кирилин В.Т., Кожевников М.В. Информационные технологии на полигонах. Твердые бытовые отходы. 2011. № 6. С. 34–35.
12. Концепция обращения с твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации. МДС 13-8.2000. Утверждена постановлением коллегии Госстроя России от 22 декабря 1999 г. №17. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=345232#07561933345122578> (дата обращения 03.10.2018).

References

1. Golubev A.A., Gudim Yu.A., Grachev V.A., Dydychkin V.P. Sposob bezotkhodnoi termicheskoi pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i agregat dlya ego osushchestvleniya. Patent RF RU 2 461 776. Data podachi 20.06.2010, data publikatsii 20.09.2012. Federal'nyi institut promyshlennoi sobstvennosti. Otfitsial'nyi byulleten' "Izobreteniya. Poleznye modeli". 2012. № 26. S. 1–16.
2. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Grachev V.A. Odnostadiinaya pirometallurgicheskaya pererabotka metallicheskih radioaktivnykh otkhodov. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. T. 22. № 5. S. 4–9.
3. Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. i dr. Plavka v zhidkoi vanne. Pod red. A.V. Vanyukova. M., Metallurgiya, 1988. 208 s.
4. Mechev V.V., Grechko A.V., Denisov V.F. i dr. Polupromyshlennaya pererabotka bytovykh otkhodov v pechi Vanyukova. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1993. № 1. S. 26–27.
5. Protsess Romelt. Pod red. A.V. Romentsa. M., ID Ruda i metally, 2005. 400 s.
6. Rutberg F. Vytaskivaem vsyu energiyu, kotoraya sodержitsya v veshchestve. *Ezhednevnyaya elektronnyaya gazeta Fail-RF*. 17 iyunya 2011. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://file-rf.ru/analytics/168> (data obrashcheniya ???).
7. Addink R., Olie K. Mechanisms of formation and destruction of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in heterogeneous systems. *Environmental Science and Technology*. 1995. V. 29. № 6. P. 1425–1435. DOI: 10.1021/es00006a002
8. Kabanova T.S., Zaitsev V.A., Yagodin G.A. Ekologicheskie problemy termicheskoi pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2010. Fevral'. S. 47–49.
9. Ashpina O. Dorogoi nash TBO. *The Chemical Journal*. 2010. № 8. S. 27–31.
10. Kalinin V.I. Nauchno-tekhicheskie osnovy termicheskoi utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov. *Nauchno-issledovatel'skii institut stroitel'nykh materialov i kompozitov*. 2002. [Elektronnyi resurs]. URL: www.stromkomposit.ru/42.html (data obrashcheniya ???).
11. Kirilin V.T., Kozhevnikov M.V. Informatsionnye tekhnologii na poligonakh. *Tverdye bytovye otkhody*. 2011. № 6. S. 34–35.
12. Kontseptsiya obrashcheniya s tverdymi bytovymi otkhodami v Rossiiskoi Federatsii. MDS 13-8.2000. Utverzhdena postanovleniem kollegii Gosstroya Rossii ot 22 dekabrya 1999 g. №17. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=345232#07561933345122578> (data obrashcheniya 03.10.2018).

В.А. Грачев – д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Центр глобальной экологии факультета глобальных процессов МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Россия, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 13А, e-mail: vgrachev@gmail.com • А.А. Голубев – зам. ген. директора, ООО Промышленная компания "Технология металлов", 454090 Россия, г. Челябинск, ул. Свободы 83, оф. 307, e-mail: a.golubev@metalstech.ru • Ю.А. Гудим – д-р техн. наук, зам. ген. директора по научной работе, e-mail: mail@metalstech.ru

V.A. Grachev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of RAS, Center for global Ecology, Faculty of Global Processes, Lomonosov Moscow State University, 119991 Russia, Moscow, Leninsky Gory 1, bld. 13, e-mail: vgrachev@gmail.com • A.A. Golubev – Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director, LLC Industrial company "Technology of metals", 454090 Russia, Chelyabinsk, Svobody Str. 83, of. 307, a.golubev@metalstech.ru • Yu.A. Gudim – Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Research, e-mail: mail@metalstech.ru