

Исследование процессов обработки

УДК 621.623

Ю. Д. Филатов (г. Киев)

Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком

На основе кластерной и физико-статистической моделей образования частиц шлама обрабатываемого материала описаны закономерности образования микрорельефа полированной поверхности. Показано, что производительность полирования неметаллических материалов экспоненциально снижается при увеличении их энергии связи, а шероховатость полированной поверхности зависит от отношения частот собственных колебаний молекулярных фрагментов на поверхности инструмента и обрабатываемой детали.

Ключевые слова: полирование, частицы шлама, производительность полирования, микрорельеф и шероховатость поверхности.

Основными показателями, характеризующими эффективность процесса полирования прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов (НМ), являются производительность съема обрабатываемого материала и интенсивность износа рабочего слоя инструмента, а также шероховатость и чистота обработанной поверхности и точность ее геометрической формы. Точность и качество (шероховатость, оптическая чистота, отражающая способность, дефектность и т. п.) обработанных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, декоративно-художественных изделий и архитектурных форм в строительной индустрии напрямую зависят от размеров частиц шлама и их поведения в зоне контакта инструмента и детали. Вместе с тем механизм взаимодействия диспергированных в процессе полирования частиц шлама и частиц износа рабочего слоя инструмента до настоящего времени не выяснен окончательно. Этим обусловлено несовершенство существующих технологий финишной обработки НМ, в особенности, полирования. Актуальность рассматриваемой проблемы состоит в том, что повышение производительности полирования НМ инструментом со связанным полировальным порошком и улучшение качества обработки возможно лишь на основании изучения влияния физико-химических

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, 2008

свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте на эффективность процесса полирования.

Результаты исследований механизма полирования стекла, кремнезем- и глиноземсодержащих материалов, оптических кристаллов и керамики, полученные за последние десятилетия [1—6], позволили объяснить целый ряд теоретически и экспериментально установленных закономерностей этого процесса. Исходя из кластерной модели износа [1, 5] показано, что при полировании SiO_2 накопление энергии в критическом объеме обрабатываемого материала — кластере происходит до тех пор, пока его энергия E_{cl} не превысит энергию связи $E_b = \sum_k \alpha_k E_{1k}$ (где E_{1k} — энергия единичной связи Me—O

в Me_xO_y , α_k — содержание оксида), т. е. материал может отделиться в виде частицы шлама только при $E_{cl} > E_b$. Распределение частиц шлама по размерам описывается распределением Пуассона с параметром $\nu = E_b/E_{cl}$, а вероятность образования частиц шлама пропорциональна $\exp(-\nu)$ [6—7]. Анализ закономерностей образования и удаления частиц шлама при финишной обработке неметаллических материалов в рамках физико-статистической модели [8] позволил установить, что размеры частиц, образующихся в процессе полирования, удовлетворяют неравенству $d_i < R_{\max}$, в отличие от частиц, образующихся при шлифовании, размер которых $d_i > R_{\max}$ (рис. 1). На основании указанного можно считать, что удаление обрабатываемого материала при полировании инструментом со связанным полировальным порошком является результатом процессов диспергирования микро- и наночастиц. Размеры этих частиц, их концентрация в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали и характер взаимодействия с частицами износа и контактирующими поверхностями определяют как производительность полирования и интенсивность износа инструмента, так и состояние этих поверхностей.

Размеры частиц шлама определяются через число $\xi = [\omega_{01}^2/(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)]^2$ молекулярных фрагментов, образующих кластер, зависящее от частот их собственных колебаний ω_{01} и ω_{02} на поверхностях обрабатываемой детали и инструмента соответственно [5—7]. Энергия кластера определяется суммарной колебательной энергией фрагментов $E_{cl} = \hbar\omega_{01}\xi$ (где \hbar — постоянная Планка) [7]. Площадь поверхности i -й частицы шлама определяется как $S_i = S_0(i + 1)$ (где S_0 — площадь поверхности молекулярного фрагмента, которая зависит от структуры обрабатываемого материала и определяется в зависимости от ξ и расстояний между соседними поверхностными молекулами и между молекулярными слоями [1]). Размеры частиц определяются по значениям площади их поверхности S_i , а их наиболее вероятный размер $a_\nu = \sum_i d_i p(i, \nu)$, где $p(i, \nu)$ — распределение Пуассона [6]. Несмотря на устано-

вившиеся представления о физико-химическом характере съема материала при полировании и его принципиальных отличиях от процессов микрорезания и хрупкого разрушения, наблюдаемых при шлифовании, исследователи с завидным упорством пытаются установить закономерности, связывающие производительность полирования (полирующую способность) и шероховатость полированной поверхности с механическими характеристиками обрабатываемого материала и инструмента. Бурже и Пейшис связывали производительность полирования стекла с твердостью (по Моосу) полировального порошка [9], Командури, Люка и Тейни — с твердостью (по Виккерсу) обрабатываемого материала [2], Гильман и Якобс — с твердостью (по Шору) полировального инструмента и микротвердостью (по Кнупу) обрабатываемого

стекла [3]. Как и следовало ожидать, никакой корреляции между интенсивностью съема обрабатываемого материала и указанными механическими характеристиками не наблюдается. Шероховатость обработанной поверхности также не коррелирует с этими характеристиками (rms — среднее квадратическое отклонение профиля полированных поверхностей деталей из оптического стекла практически не зависит от его микротвердости по Кнупу [3]), а изменяется пропорционально a_v [10]. Концентрация частиц шлама у поверхности обрабатываемой детали пропорциональна $\exp(-E_b/E_{cl})$ [6—7], а на поверхности инструмента взаимодействующие с ней частицы шлама локализуются в виде налета [11].

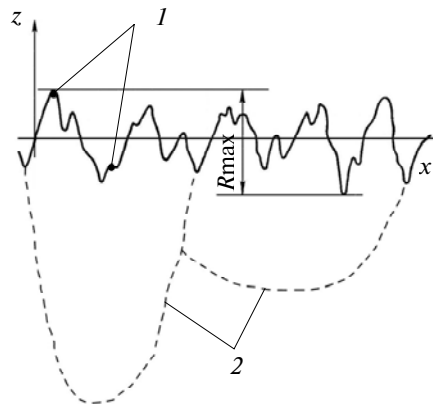


Рис. 1. Микропрофиль обработанной поверхности частиц, образующихся при полировании (1) и шлифовании (2).

На рис. 2 представлена зависимость производительности полирования неметаллических материалов. Экспериментальные результаты и данные Командури, Люка, Тейни [2] и Гильмана, Якобса [3] представлены в относительных единицах (по отношению к оптическому стеклу марок К8 и ВК7). Энергия связи рассчитана исходя из данных по химическому составу в соответствии с каталогом оптического стекла по ГОСТ 3514—94 и Optical Glass Catalog Schott. Данная зависимость в полулогарифмическом масштабе аппроксимирована линейной функцией (погрешность аппроксимации — 15%), что подтверждает активационный характер процесса удаления обрабатываемого материала и экспоненциальную зависимость производительности полирования от энергии связи обрабатываемого материала. Тангенс угла наклона прямой $\text{tg}\alpha_0 = 1/E_{cl} = 9,1 \cdot 10^{-3}$ позволяет оценить значение энергии кластера — $E_{cl} = 110$ ккал/моль, что практически совпадает со значением энергии единичной связи Si—O (106 ккал/моль).

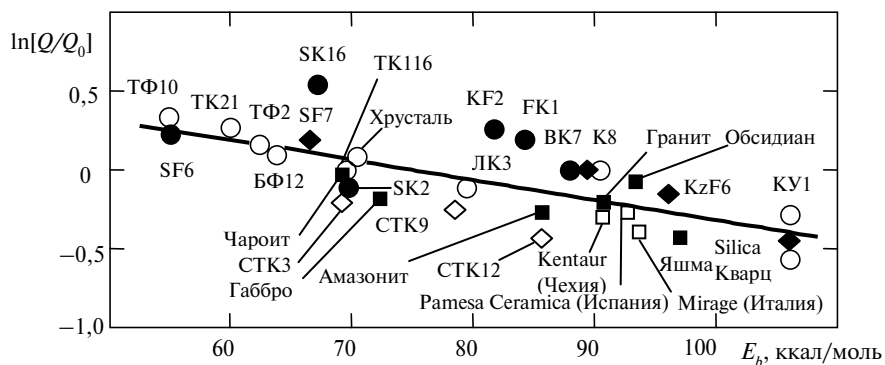


Рис. 2. Зависимость производительности полирования неметаллических материалов от их энергии связи: оптического стекла (\circ), в том числе сверхтяжелых кронов (\diamond), природных (\blacksquare) и синтетических (\square) кремнеземсодержащих материалов; данные [2] (\bullet) и [3] (\blacklozenge).

Шероховатость поверхности деталей из неметаллических материалов после полирования инструментом со связанными полировальными порошками диоксида церия и оксида алюминия измеряли при профилометрировании

плоских образцов на профилографах-профилометрах мод. 250, “Talysurf-5-120” фирмы “Taylor Hobson” и “Perthometer Concept” фирмы “Mahr Federal”. Зависимости экспериментальных значений параметра шероховатости Ra полированных поверхностей деталей из НМ от расчетных величин наиболее вероятного размера a_v частиц шлама и их объема ($V_v = \pi a_v^3/6$), представленные в табл. 1, обусловлены зависимостью шероховатости от числа ξ молекулярных фрагментов, которая может быть аппроксимирована линейной функцией вида $Ra = \alpha\xi + \beta$ (где $\alpha = 0,01$ нм, $\beta = 6,6$ нм — коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации — 17 %).

Таблица 1. Экспериментальные значения параметра шероховатости Ra поверхности деталей из НМ, полированных инструментами на основе диоксида церия и оксида алюминия, в зависимости от наиболее вероятного размера частиц шлама и их объема

Обрабатываемый материал	Полировальный порошок в инструменте	a_v , нм	V_v , нм ³	Ra , мкм
Амазонит	CeO ₂	8,4	268	0,018±0,003
Обсидиан	CeO ₂	7,5	180	0,020±0,007
Чароит	CeO ₂	8,8	382	0,020±0,003
Яшма	CeO ₂	5,6	113	0,013±0,005
Базальт	CeO ₂	14,2	1437	0,055±0,010
Габбро	CeO ₂	11,8	905	0,035±0,010
Гранит	CeO ₂	11,5	905	0,030±0,005
Kentaur	CeO ₂	11,7	905	0,040±0,006
Kentaur	Al ₂ O ₃	9,7	524	0,030±0,006
Mirage	Al ₂ O ₃	9,7	524	0,028±0,008
Pamesa	Al ₂ O ₃	9,8	524	0,035±0,010
Ceramica				
Базальт	Al ₂ O ₃	7,1	180	0,020±0,007
Габбро	Al ₂ O ₃	1,5	697	0,030±0,004
Стекло К8	CeO ₂	3,2	14	0,004±0,001

Анализируя полученную зависимость, можно заключить, что чем меньше отличаются частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов ω_{01} и ω_{02} , т. е. чем ближе к единице величина их отношения $\beta = \omega_{02}/\omega_{01}$, тем больше ξ и тем выше значение Ra . В табл. 2 приведены числа молекулярных фрагментов, частот их собственных колебаний ω_{01} , ω_{02} (наиболее близко расположенных в инфракрасных спектрах поглощения) и β , характерные для полирования кварцевого оптического стекла марки КУ при помощи различных полировальных порошков. При этом учтено, что для кварцевого стекла характерными частотами являются 443 и 568 см⁻¹, которые обусловлены колебаниями мостиковых атомов кислорода перпендикулярно направлению Si—Si как в площади угла Si—O—Si, так и перпендикулярно к этой плоскости, и частота 811 см⁻¹, обусловленная колебаниями атома кремния [12]. Для НМ, приведенных в табл. 1, характерные частоты определяли экспериментально по инфракрасным спектрам отражения. Из всех частот выбирали ближайšie

к частотам собственных колебаний, присущим полировальным порошкам CeO_2 ($\omega_{02} = 465 \text{ см}^{-1}$) и Al_2O_3 ($\omega_{02} = 520 \text{ см}^{-1}, 620 \text{ см}^{-1}$). На рис. 3 приведена зависимость параметра шероховатости Ra от отношения частот собственных колебаний фрагментов на поверхностях инструмента и обрабатываемого материала. Для поверхностей, полированных CeO_2 , экспериментальное (0,26—0,29 нм [6, 12]) значение Ra совпадает с расчетным (0,27 нм).

Таблица 2. Значения частот собственных колебаний молекулярных фрагментов ω_{01} , ω_{02} и величина их отношения β

Полировальный порошок	ω_{01}		ω_{02}		β	ξ
	см^{-1}	$10^{13}, \text{с}^{-1}$	см^{-1}	$10^{13}, \text{с}^{-1}$		
ThO_2	443	8,35	466	8,78	1,051	90
CeO_2	443	8,35	465	8,77	1,050	96
MgO	811	15,29	845	15,93	1,042	137
Cr_2O_3	568	10,71	550	10,37	0,968	256
ZrO_2	443	8,35	456	8,60	1,030	271
Fe_2O_3	568	10,71	550	10,38	0,969	272

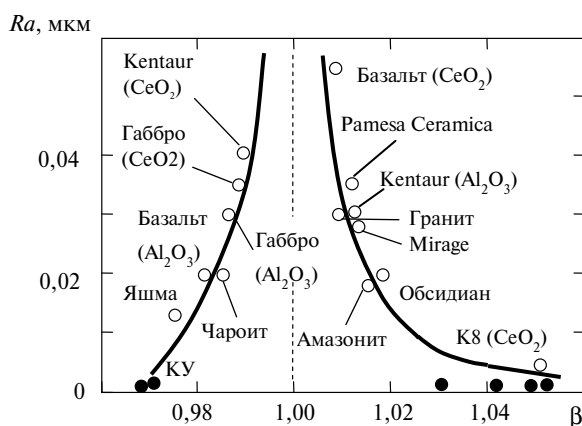


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости Ra от отношения частот собственных колебаний фрагментов на поверхности инструмента и обрабатываемого материала: экспериментальные значения из табл. 1 (\circ), значения параметра шероховатости поверхности кварцевого стекла КУ, рассчитанные по формуле $Ra = 0,06a_v$ [12] (\bullet).

Анализируя полученную зависимость, можно заключить, что при уменьшении разности частот собственных колебаний фрагментов на поверхностях инструмента и обрабатываемого материала шероховатость полированной поверхности резко возрастает. Это подтверждает резонансный характер взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала при полировании кремнезем- и глиноземсодержащих материалов (стекла, строительного и поделочного камня) и согласуется с результатами исследования дефектов на поверхности стекла [7].

При полировании полимерных оптических материалов наблюдается аналогичная закономерность. Наименьшая шероховатость обработанной поверхности полиметилметакрилата (ПММА) по данным [13], выраженная средним квадратичным отклонением rms профиля Rq , достигается при использовании полировального порошка диоксида циркония. На рис. 4 представлена зависимость параметра шероховатости Rq [13] полированной поверхности ПММА

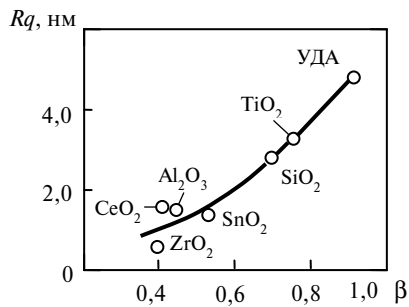


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости Rq от отношения частот собственных колебаний полировальных порошков и ПММА [13].

и размерами частиц шлама, которые удаляются с нее в процессе полирования. Именно величина наиболее вероятного размера частиц шлама a_v определяет высотные параметры шероховатости и их взаимосвязь [12]: $Rq = k_q Ra$, $R_{max} \approx 3Rq$. Для SiO_2 коэффициент $k_q \approx 1,6$, а минимально возможная шероховатость атомно-гладкой поверхности соответствует максимальной высоте неровностей профиля $R_{max} = 1,68$ нм.

При исследовании микрорельефа плоской поверхности оптической детали из стекла марки К8 методом атомной силовой микроскопии в [15] установлена координатная зависимость параметров шероховатости. Анализ микропрофиля поверхности, обработанной при помощи инструмента “Акваспол” [6] из полировальных порошков на основе CeO_2 , позволил определить параметры шероховатости Ra и Rq в зависимости от координаты исследуемой зоны. Полученные зависимости среднего арифметического отклонения профиля Ra и среднего квадратичного отклонения профиля Rq поверхности от координаты x исследуемого участка могут быть описаны следующей формулой (рис. 5, кривые 1 и 2):

$$\begin{pmatrix} Ra(x) \\ Rq(x) \end{pmatrix} = R_{max} \begin{pmatrix} 1 \\ k_q \end{pmatrix} \sin \left(2\pi \left(\frac{x}{\Delta} - \delta \right) \right) + \begin{pmatrix} Ra_m \\ Rq_m \end{pmatrix},$$

где Ra_m и Rq_m — средние значения параметров шероховатости, $\Delta = 4,5$ мм — ширина круговой зоны на обработанной поверхности (период функции), $\delta = \frac{Ra_{min}}{Ra_{max}} \approx \frac{Rq_{min}}{Rq_{max}}$ — коэффициент (фазовый сдвиг), Ra_{min} , Rq_{min} , Ra_{max} и

Rq_{max} — минимальные и максимальные значения параметров шероховатости в зоне.

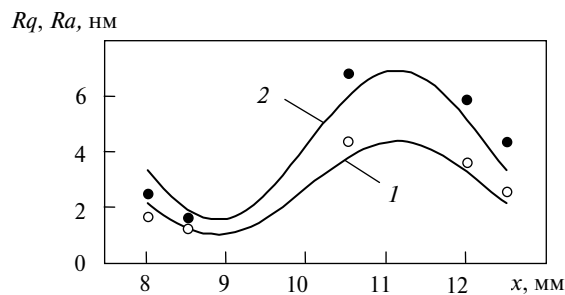


Рис. 5. Зависимость параметров шероховатости Ra (1) и Rq (2) от координаты x .

($\omega_{01} = 1172$ см⁻¹), обработанной при помощи абразивных порошков ультрадисперсного алмаза (1100 см⁻¹ [14]), TiO_2 (880 см⁻¹), SiO_2 (811 см⁻¹), SnO_2 (610 см⁻¹), Al_2O_3 (520 см⁻¹), CeO_2 и ZrO_2 (см. табл. 2) [12], от величины β (в скобках — значение ω_{02}).

Зависимость шероховатости полированной поверхности деталей из НМ (табл. 1 и 2, рис. 3 и 4) от числа молекулярных фрагментов, частот собственных колебаний ω_{02} , ω_{01} и их отношения β обусловлена тем, что микрорельеф обработанной поверхности определяется числом

Координатные зависимости параметров шероховатости полированной поверхности не могут быть объяснены только с точки зрения размеров частиц шлама и их распределения, поскольку обусловлены концентрационными зависимостями частиц, траекториями их перемещения, характером их взаимодействия между собой, с частицами износа инструмента, с поверхностью инструмента и обрабатываемой детали в контактной зоне, а также образованием налета [11]. По-видимому, здесь имеется сходство с координатной зависимостью шероховатости плоских прецизионных поверхностей деталей из оптического стекла марки К8 при тонком алмазном шлифовании [16], которая объясняется на основе исследования динамики столкновений и рассеяния частиц шлама в контактной зоне с учетом интенсивности эрозионного износа обрабатываемой поверхности их потоком. Однако, при полировании НМ нельзя ограничиться лишь рассмотрением потока частиц шлама, как при алмазном шлифовании. Необходимо изучить поведение частиц шлама и частиц износа полировального инструмента в контактной зоне, определить их концентрацию, смоделировать траектории их перемещения с учетом особенностей столкновения и рассеяния наночастиц, оценить потенциалы их взаимодействия и эффективные дифференциальные сечения рассеяния.

Выводы

В результате проведенных исследований установлены и обобщены закономерности влияния физико-химических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте на эффективность процесса полирования. Показано, что определенные кластерной моделью износа поверхностей и физико-статистической моделью образования и удаления частиц шлама при полировании НМ зависимости производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности от размеров частиц соответствуют экспериментальным данным. Эти зависимости позволяют осуществить оптимальный выбор полировального порошка для изготовления рабочего слоя инструмента, при использовании которого достигается требуемое качество полированной поверхности применительно к конкретному обрабатываемому материалу.

Зависимости параметров микропрофиля полированной поверхности от координаты исследуемого участка, описанные периодическими функциями на основе результатов статистического анализа, являются выражением тонких эффектов, происходящих при полировании НМ в зоне контакта инструмента и детали, связанных с особенностями переноса и взаимодействия наночастиц шлама и износа, направленностью или хаотичностью их взаимного перемещения и воздействия на обрабатываемую поверхность.

1. Филатов Ю. Д., Rogov B. B. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Сверхтв. материалы. — 1994. — № 3. — С. 40—43.
2. Komanduri R., Lucca D. A., Tani Y. Technological advances in fine abrasive processes // Annals of the CIRP. — 1997. — 46, N 2. — P. 545—596.
3. Gillman B. E, Jacobs S. D. Bound-abrasive polishers for optical glass // Appl. Opt. — 1998. — 37, N 16. — P. 3498—3505.
4. Fahnle Oliver W., van Brug Hedser. Novel approaches to generate aspherical optical surfaces // Part of the SPIE Conf. on Optical Manufacturing and Testing, Denver, Colorado, July 1999, SPIE. — Vol. 3782. — P. 170—176.
5. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. — 2001. — № 3. — С. 36—49.

6. Rogov V. V., Filatov Y. D., Kottler W., Sobol V. P. New technology of precision polishing of glass optic // Opt. Eng. — 2001. — 40, August. — P. 1641—1645.
7. Скрябин В. В., Филатов Ю. Д., Сидорко В.И. Закономерности полирования деталей из алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. — 2004. — № 6. — С. 73—78.
8. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. — 2005. — № 1. — С. 58—66.
9. Ходаков Г. С., Кудрявцева Н. Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
10. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтв. материалы. — 1991. — № 5. — С. 61—65.
11. Филатов Ю. Д., Rogov V. B. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. — 1993. — 74, вып. 6. — С. 1229—1235.
12. Поперенко Л. В., Филатов Ю. Д. Технологія обробки оптичних поверхонь. Навч. посібник. — Київ: Видавн.-поліграф. центр “Київський університет”, 2004. — 165 с.
13. DeGroot J. E., Jacobs S. D., Schoen J. M. Polishing of PMMA and other optical polymers with magnetorheological finishing // LLE Review. — 2003. — 96. — P. 239—248.
14. Физические свойства алмаза: Справ. / Под ред. Н. В. Новикова. — Киев: Наук. думка, 1987. — 188 с.
15. Сидорко В. И., Филатов А. Ю. Состояние полированных поверхностей изделий из природного и синтетического камня / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2006. — Вып. 9. — С. 365—368.
16. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Филатов Ю. Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. — 2007. — № 6. — С. 48—57.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 30.07.07