

Упрочнение методами электромеханической пластической обработки

Электромеханическая пластическая обработка (ЭМПО) – способ обработки металла термомеханическим местным воздействием на поверхностный слой, при котором в процессе обработки детали через место контакта инструмента с деталью пропускают ток большой силы и низкого напряжения (рис. 49). Возникает сильный нагрев неровностей и поверхностного слоя металла, снижаются его прочность и твердость. Давлением инструмента обеспечивают деформацию и сглаживание поверхности, придают ей новые прочностные свойства.

Особенности процесса: тепловое и силовое воздействие на поверхностный слой осуществляют одновременно, а не последовательно. Нагрев при этом сопровождается действием значительных давлений. Нагрев поверхностного слоя металла происходит под действием двух источников теплоты: внешнего (теплота трения) и внутреннего (теплота, выделяемая при прохождении тока). Особенность второго источника – теплота, выделяемая им, создается одновременно и мгновенно во всем поверхностном слое; длительность нагрева и выдержки в зависимости от поверхности контакта и скорости обработки очень кратковременна (сотые и тысячные доли секунды); высокая скорость охлаждения из-за интенсивного отвода теплоты от тонкого поверхностного слоя внутрь холодной детали. В зависимости от числа проходов поверхностный слой подвергается многократным термомеханическим воздействиям.

В зависимости от степени влияния на структуру и свойства поверхностного слоя различают следующие режимы упрочнения: чистовой скоростной с малой и средней глубиной упрочнения; высокий с более значительной глубиной упрочнения.

При *высоких (интенсивных) режимах упрочнения* в поверхностном слое металла (на глубине) образуется светлая зона. В переходном слое отсутствует структура, свойственная той, что подвергалась значительной пластической деформации. Обработка на высоких режимах вызывает фазовые превращения в стали, наблюдаемые по изменениям ее структуры. Обработка на средних режимах приводит к возникновению в поверхностном слое металла однородной (темной или светлой) зоны. Нижележащий переходный слой сильно деформируется. Режим характеризуется частичным возвратом к зоне однородного поверхностного слоя. При этом если температура нагрева выше A_{C3} , то образуется светлый слой, связанный с фазовыми превращениями; если ниже A_{C3} , то образуется темный слой. Режимы упрочнения приведены в табл. 5.

Силу тока и скорость выбирают по таблице в соответствии с требованиями к глубине упрочнения. При этом следует иметь в виду, что предельные значения этих параметров рассчитаны на типовую геометрию инструмента ($R = 30$ мм, $r = 15$ мм) при обработке деталей средних диаметров (30-60 мм).

При обработке деталей сложной конфигурации или при использовании

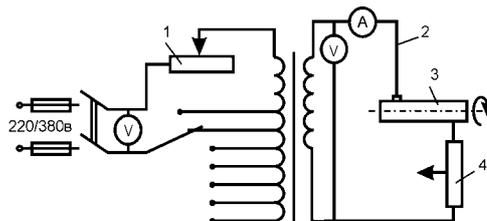


Рис. 49. Принципиальная схема устройства для электромеханической обработки: 1 – реостат; 2 – вторичная обмотка; 3 – деталь; 4 – инструмент

5. Режимы упрочнения среднеуглеродистых конструкционных сталей

Режим прочтения	Инструмент	Сила тока, А	Скорость, м/мин	Подача, мм/об	Параметр шероховатости Ra	Глубина упрочненного слоя, мм	Число проходов
Чистовой скоростной при глубине упрочнения: малой средней	Пластина	350-450	80-130	0,2-0,3	0,63-0,16	0,02-0,03	1-2
		480-600	8-15			0,06-0,10	2-3
Высокий со значительной глубиной упрочнения	Ролик	800-1200	8-10	0,2-0,3	2,5-0,63	0,15-0,30	1-2

роликового инструмента геометрические параметры его могут значительно изменяться. В этих случаях необходим расчет площади контакта инструмента с деталью. Плотность тока для режимов, А/мм²: первого 200-250; второго 270-320; третьего 400-600. Для больших обрабатываемых поверхностей следует выбирать меньшее значение плотности тока.

Глубину упрочнения рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{K\mu(0,24\eta jU + pvf / 42,7)}{cvB\rho T_{\phi}}$$

где K – коэффициент, учитывающий количество поглощаемой теплоты; в зависимости от принятых режимов обработки $K = 0,23 \div 0,26$, среднее значение коэффициента при укрупненных расчетах $K_{\text{ср}} = 0,234$; μ – коэффициент, определяющий количество теплоты, создаваемой в зоне контакта и отводимой в упрочняемую деталь; увеличение силы тока приводит к увеличению коэффициента μ , увеличение скорости сглаживания и давления способствует его понижению; для более высоких режимов $\mu \approx 0,6$, для менее высоких $\mu \approx 0,5$; η – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора; для средних условий ЭМПО коэффициент $\eta \approx 0,42$; j – сила тока вторичной цепи; U – напряжение тока во вторичной цепи; $U = 2 \div 6$ В; p – нормальное давление при сглаживании; при обработке конструкционных сталей $p \approx 0,3 \div 0,5$ ГПа; v – скорость сглаживания, см/с; f – коэффициент трения; для среднеуглеродистой стали при средних условиях ЭМПО коэффициент $f = 0,65 \div 0,75$; c – удельная теплоемкость металла, Дж/(г·°С); B – ширина контакта, мм; ρ – плотность, г/см³; T_{ϕ} – температура фазового превращения металла (точка A_{c3}), °С.

На усилии электромеханического сглаживания влияют площадь поверхности контакта инструмента с изделием и физико-механические свойства поверхностного слоя. В свою очередь, поверхность контакта зависит в основном от исходной шероховатости и кривизны контактирующих поверхностей детали и инструмента. В том случае, если давление $p \leq p_{\text{расч}}$ (расчетное давление), то шероховатость поверхности увеличивается; если $p > p_{\text{расч}}$, то процесс сглаживания начинает переходить в процесс высадки и появляется так называемая вторичная шероховатость.

Давление $p_{\text{расч}}$ можно рассчитать по формуле:

$$p_{\text{расч}} = \omega K_{\text{п}} \sigma'_{\text{в}} F \left(\frac{Rz}{Rz - a} \right)^m,$$

где ω – коэффициент скорости; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности; $\sigma'_{\text{в}}$ – предел прочности нагретого металла; F – площадь поверхности контакта; Rz – параметр шероховатости сглаживаемой поверхности; a – сближение инструмента и детали при сглаживании; m – показатель политропы сжатия. Значения коэффициента ω приведены в табл. 6.

Мощность (кВт) процесса сглаживания неровностей и упрочнения поверхности электромеханической пластической обработкой можно рассчитать по формуле, пренебрегая при этом величиной работы, совершаемой при подаче инструмента:

$$N_3 = p_{\text{расч}} f v / (60 \cdot 120).$$

При выборе метода упрочнения электромеханической пластической обработкой и установлении режимов этой обработки учитывают состояние исходной структуры металла, его дисперсность и химический состав. Мелкозернистая структура, обладая большим сопротивлением и большей суммарной поверхностью раздела, способствует более интенсивному выделению теплоты, лучшей растворимости легирующих элементов, карбидов и нитридов, а также более глубокой прокаливаемости поверхностного слоя, отличается меньшей электрической проводимостью. По мере увеличения температуры отпуска электрическая проводимость закаленной стали повышается, что связано с понижением степени дисперсности ее структуры.

Отдельные составляющие структуры поликристаллов (например, перлит, феррит и цементит) обладают различным сопротивлением прохождению тока. Наибольшее сжатие силового потока и наиболее высокая температура возникают по границам различных включений или пор. Это обстоятельство имеет большое значение при обработке поверхностных слоев, образованных при восстановлении деталей наплавкой и металлизацией и содержащих много пор и других объемных дефектов.

Если обработку проводят на режиме, при котором отсутствуют фазовые превращения и поверхностный слой имеет темный цвет, то температуру обра-

6. Значения коэффициента ω

Скорость рабочего органа машины, м/мин	Температура обработки, °С		
	до 0,5 T	св. 0,5 T при неполной горячей деформации	св. 0,5 T при горячей деформации
16-42	1,1	1,4-2,4	1,2-1,6
42-125	1,15	2,4-3,0	1,6-2,0
Св. 160	1,25	3,5	2,5

Примечание. T – абсолютная температура плавления обрабатываемого материала.

ботки принимают ниже $0,5 T_{\phi}$ (T_{ϕ} – температура фазовых превращений). В том случае, когда обработку проводят с фазовыми превращениями, поверхностный слой светлый, но переходный слой имеет ярко выраженную завихренность (текстурированность), температуру обработки можно принять выше $0,5 T_{\phi}$ при неполной горячей деформации. При наличии фазовых превращений в поверхностном слое и резком переходе к исходной структуре без заметной завихренности температура обработки должна быть выше $0,5 T_{\phi}$ (горячая деформация). При высоких температурах и значительных давлениях в процессе ЭМПО возможно появление растягивающих остаточных напряжений в светлом поверхностном слое обрабатываемой стали, несмотря на мартенситное строение его структуры. При умеренных температурах (ниже A_{c3}) и небольших давлениях в мартенситной структуре могут появиться сжимающие остаточные напряжения.

При высокотемпературной деформации, когда температура процесса выше A_{c3} , возникает горячий наклеп металла. В результате деформированные зерна приобретают мелкодисперсное строение, уплотняются и частично срастаются, диффузионно свариваются и соединяются между собой. Поверхностный слой принимает темный цвет. Такой слой металла характеризуется уменьшением начального объема и, следовательно, появлением растягивающих остаточных напряжений. Давление обрабатываемой пластины при ЭМПО создает тангенциально направленную силу трения, которая способствует вытягиванию наружных слоев металла, возникновению растягивающих остаточных напряжений. Избежать этого можно в случае применения вращающегося ролика вместо пластины.

Многократное термомеханическое воздействие на поверхностный слой стальной детали способствует созданию более мелкой, однородной и плотной структуры. При многократном воздействии, характеризующемся числом проходов инструмента по упрочняемой поверхности, показатель политропы сжатия можно рассчитать по формуле

$$m = lN/S,$$

где l – длина контакта инструмента с деталью, мм; N – число повторных ходов; S – подача, мм/об.

Твердость упрочненного поверхностного слоя зависит от числа проходов инструмента, скорости сглаживания (скорости пластического деформирования), давления на поверхность в точке (зоне) контакта, а также от физико-химических особенностей металла обрабатываемой детали. При прочих равных условиях твердость возрастает с увеличением количества углерода в стали, числа проходов инструментом и давления на инструмент. Наибольшей твердостью обладает поверхностный слой глубиной 0,02-0,1 мм. Зависимость твердости поверхностного слоя стальных деталей после упрочнения ЭМПО от перечисленных факторов приведена на рис. 50. Упрочнение ЭМПО можно выполнить жестко закрепленным инструментом или принудительно вращающимся роликом (рис. 51).

В качестве неподвижного жестко закрепленного инструмента применяют пластины или ролики твердого сплава Т15К6 с двойным радиусом скругления торца; например, $R = 25\div 40$ мм, $r = 15$, где R – радиус в плане; r – радиус профиля пластины (ролика).

При одинаковых режимах ЭМПО глубина упрочненного слоя выше при сглаживании неподвижным инструментом. В этом случае имеет место трение

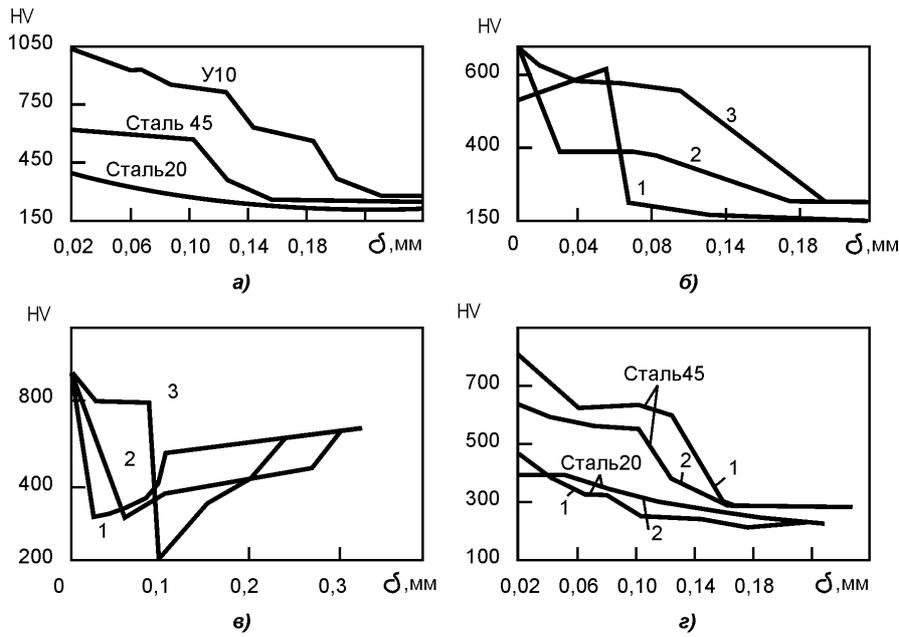


Рис. 50. Зависимость твердости поверхностного слоя от содержания углерода в стали (а), числа проходов инструмента (б), скорости сглаживания (скорости упрочняющей пластической деформации) (в) и давления на инструмент (г):

а – $p = 700$ Па; $I = 600$ А; $v = 3,2$ м/мин; $S = 0,195$ мм/об; **б** – сталь 40Х, 318 НВ, $I = 710$ А, $v = 8$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об; **в** – сталь 40Х, 536 НВ, $I = 470$ А, $p = 500$ Па, $S = 0,2$ мм/об; на рис. б и в; 1 – $v = 82,2$ м/мин; 2 – $v = 54,1$ м/мин; 3 – $v = 13,6$ м/мин; 2 – 1 = 600 А; $v = 3,2$ м/мин; $S = 0,195$ мм/об (1 – $p = 100$ Па; 2 – $p = 700$ Па)

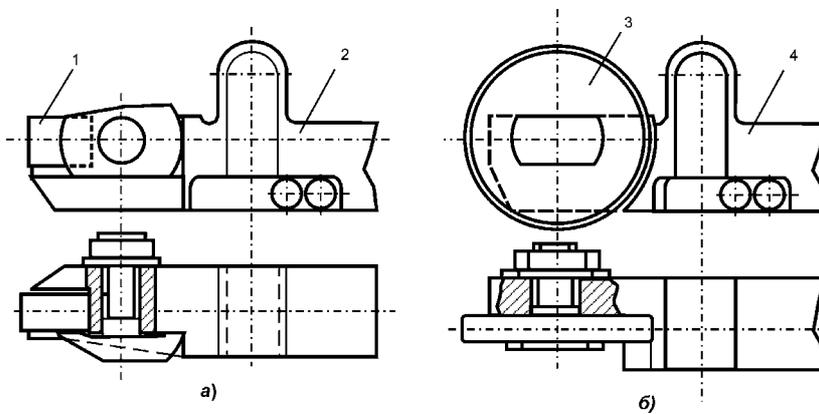


Рис. 51. Примеры конструкций деформирующих инструментов:
а – с твердосплавной пластинкой; **б** – с твердосплавным роликом;
 1 – давящая твердосплавная пластинка; 2 – пружинная однопетлевая державка; 3 – давящий неподвижный твердосплавленный ролик; 4 – боковые опоры

скольжения, что приводит к образованию завихренной текстуры и более интенсивному измельчению структуры поверхностного слоя.

Детали, упрочненные неподвижным инструментом, по сравнению с деталями, упрочненными подвижным инструментом, обладают большей выносливостью и износостойкостью. При работе неподвижным инструментом, имеющим радиусный профиль, на нем быстро образуется площадка. Поэтому на радиусе нужно выполнить поясok шириной 0,5 мм, что в несколько раз увеличивает стойкость инструмента. Перед каждой очередной операцией инструмент-ролик поворачивают на угол 10-15° для обновления поверхности контакта.

К недостаткам неподвижного инструмента относится его сравнительно небольшая стойкость. Поэтому он находит применение при обработке небольших поверхностей типа шеек валов. При упрочнении валов диаметром 60-100 мм из среднеуглеродистых нормализованных сталей с параметрами шероховатости $Ra = 0,63 \div 0,08$ мкм профильный радиус ролика диаметром 45 мм может быть принят равным 15 мм. Режим обработки: сила тока $I = 400 \div 450$ А, подача $S = 0,21$ мм/об, сила прижатия $P = 500 \div 700$ Н.

Упрочнение колец диаметром 60-100 мм, изготовленных, например, из отожженной стали 40Х, можно осуществить неподвижной пластиной из твердого сплава Т15К6 (геометрия пластины: $R = 30$ мм, $r = 15$ мм) при следующем режиме обработки: $I = 400$ А, $v = 6,5$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об, $P = 200$ Н.

Для повышения стойкости инструмента подача при ЭМПО не должна совпадать с подачей, применявшейся при резании. Целесообразно при этом использовать охлаждение сжатым воздухом, эмульсией или любой пожаробезопасной смазочно-охлаждающей средой. Например, предварительную обточку под сглаживание выполняют при режиме резания $v = 120 \div 130$ м/мин, $t = 0,3$ мм, $S = 0,17$ мм/об резцом из сплава Т15К6, имеющим следующую геометрию: $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 30^\circ$, $r = 0,5$ мм. После предварительной токарной обработки параметры шероховатости поверхности соответствуют $Rz = 40 \div 10$ мкм. Поэтому последующее выполнение операции выглаживания на указанных выше режимах будет эффективным при достаточной стойкости инструмента.

При чистовой обработке нежелательно возникновение схватывания контактируемых материалов, так как это ведет к образованию нароста на твердом сплаве и резкому увеличению шероховатости поверхности. Поэтому при изготовлении деформирующего инструмента твердые сплавы типа ВК, обладающие большой склонностью к схватыванию, следует заменять сплавами типа ТК.

Преимущества вращающегося ролика: высокая стойкость, возможность упрочнения деталей на большую глубину. Вращающийся ролик применяют при обработке больших поверхностей, когда не предъявляют высоких требований к их волнистости, а также во всех случаях при обработке чугуна.

Процесс ЭМПО выполняют при постоянном токе. Источниками постоянного тока могут быть мощные низковольтные выпрямители, электромашинные преобразователи, генераторы постоянного тока, сварочные трансформаторы, трансформаторы машин для точечной и контактной сварки и др. При выборе мощности трансформатора следует учитывать продолжительность его включения. При ЭМПО она может достигать 30-50%, что неизбежно отразится на увеличении необходимой номинальной мощности.

Для многих процессов упрочнения ЭМПО, в особенности при одновременном использовании нескольких инструментов, а также при обработке крупнога-

баритных деталей требуется большая мощность источника тока. Необходимая сила тока во вторичной контуре может достигать 2000-3000 А и выше. В этих случаях наиболее подходящими являются трансформаторы для контактной сварки мощностью 25-50 кВт. Диапазон их регулирования при установлении режима процесса может быть расширен введением в первичную цепь трансформатора напряжения 220/380 В. Более плавное регулирование силы тока может быть осуществлено реостатом, который устанавливают в первичную цепь трансформатора. В генераторах постоянного тока регулирование силы тока можно производить реостатом, включенным в цепь возбуждения.

При использовании выпрямителей регулирование силы тока может быть осуществлено с помощью введенного в питающую сеть специального автотрансформатора или с помощью мощного ступенчатого реостата, включаемого последовательно в низковольтную цепь (например, от 0,015 до 2 Ом).

Упрочнение быстрорежущих и высоколегированных инструментальных сталей методом электрохимической пластической обработки. Выполняют преимущественно для поверхностей инструментов, например, сверл, фрез, разверток, зенкеров и др., изготовленных из быстрорежущих и легированных инструментальных сталей, а также инструментов для обработки давлением, например, пуансонов, матриц, ножей, изготовленных из высоколегированных инструментальных сталей.

Упрочнению подвергают закаленный, окончательно обработанный инструмент или детали. ЭМПО режущих инструментов выполняют по задним поверхностям режущих зубьев. Зубья сложнопрофильных инструментов, например, таких, как долбяки, червячные фрезы, резьбонарезные гребенки, зубострогальные резцы, упрочняют по передней поверхности. В деталях типа пуансонов, матриц и ножей упрочнению подвергают образующие и торцовые (передним и задним) поверхности. ЭМПО инструментальных (в том числе быстрорежущих) сталей позволяет создать однородную структуру поверхностного слоя металла на глубину до 0,15 мм, с микротвердостью в 1,3-1,6 раза превышающей исходную. Стойкость упрочненных этим методом режущих инструментов, например сверл, изготовленных из быстрорежущих сталей типа Р9, в среднем в 1,7-2,1 раза выше, чем у инструментов, не подвергавшихся такому упрочнению.

При установлении режима упрочнения ЭМПО инструментальных сталей нужно учесть следующие требования, предъявляемые к инструментам и вызывающие особенности в технологическом процессе этой обработки: необходимость создания в металле инструмента мелкодисперсной структуры поверхностного слоя, обладающей высокой твердостью и износостойкостью; сохранения этих свойств в процессе резания и при повторной заточке, доводке и шлифовании.

В результате ЭМПО в поверхностном слое закаленных инструментальных сталей происходят фазовые структурные превращения с образованием мелкодисперсной структуры, обладающей высокой твердостью и отличающейся высокой отражающей способностью света ("белый слой"). На основные характеристики упрочненного слоя влияют электрические, механические и временные параметры режима процесса упрочнения. С ростом силы тока возрастают микротвердость и толщина упрочненного слоя. Увеличение силы пластического деформирования способствует росту количества дислокаций и, следовательно, созданию мелкодисперсной структуры в поверхностном слое. Дисперсность

структуры определяет глубину фазовых превращений и увеличение микротвердости упрочненного слоя.

Вместе с тем в конкретных условиях обработки существует предельное значение силы тока (например, при упрочнении сверл диаметром 20 мм, изготовленных из стали Р9, при ЭМПО на режиме: $P = 900$ Н, $U = 6$ В, $v = 10,2$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об предельное значение силы тока $I = 1000$ А). Превышение предельной силы тока сопровождается выделением такого количества теплоты, которое не успевает отводиться в тело детали. Так как быстрорежущие и подобные им высоколегированные стали обладают малой теплопроводностью, то в результате возникновения большого количества теплоты происходит отпуск закаленной стали и снижение эксплуатационных характеристик упрочняемого изделия.

Увеличение давления снижает электрическое сопротивление в зоне контакта, что уменьшает количество выделяемой теплоты. Оптимальное значение радиальной силы при ЭМПО быстрорежущих инструментов основной номенклатуры и типоразмеров составляет 800-1100 Н. Время контакта определяется скоростью обработки. Продолжительность процесса влияет на количество теплоты, выделяющейся в зоне контакта инструмента с деталью. Превышение предельно допустимой продолжительности процесса вызывает появление избыточной теплоты и вследствие этого возникает отпуск закаленной стали, ухудшение качества изделия. Критическую продолжительность процесса следует установить пробной обработкой. Так, для сверл, принятых выше в качестве примера, время обработки на указанных выше режимах, но при силе тока $I = 700$ А, не должно превышать 0,09 с.

Эффективный метод упрочнения поверхностных слоев деталей машин

Д.т.н., проф. А.Н. Евдокимовой предложен метод фрикционного упрочнения поверхностных слоев деталей машин для повышения их трибохарактеристик.

Для улучшения качества поверхностных слоев деталей машин применяют разные технологические методы, среди которых известной эффективностью отличается фрикционный метод, позволяющий формирование белых слоев. Эти слои отличаются высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью и получаются при одновременном влиянии на сталь высоких температур и деформаций.

Проф. А.Н. Евдокимовой был разработан метод фрикционного упрочнения с целью получения более износоустойчивых поверхностей деталей машин. Суть метода коротко изложена ниже. На рис. 52 а показана обычная схема, по которой реализуют упрочнение фрикционным диском.

При большой скорости диска 2, порядка 70 м/с, в поверхностных слоях детали 1 образуется белый слой некоторой толщины. При этом диск, который вращается, создает в поверхностных слоях детали сдвиговые деформации, которые ограничивают величину рационального деформирования и, вследствие этого, возможности увеличения твердости и глубины белого слоя. В связи с этим предлагается генерировать в поверхностных слоях знакопеременные деформации путем использования совместной работы двух дисков (рис. 52 б, в). В зависимости от направления вращения дисков 2, 3 в поверхностных слоях возникают од-