



Моделирование температурных напряжений в железобетонных плитах покрытия аэродромов средствами SCAD

В этой статье мы проанализируем возможности образования продольных трещин в железобетонных плитах покрытия аэродромов в результате температурного воздействия.

1. Мотивация

В одном из аэропортов страны через 3 года после капитального ремонта покрытия (устройство дополнительного покрытия толщиной 0.32 м поверх существующих слоев,

эксплуатируемых ранее) после жаркого лета с многочисленными осадками образовалось большое число трещин в угловых областях плит и продольно-поперечных в центральных частях плит.

2. Некоторые особенности покрытия

Характер повреждения плит имеет отчетливо выраженную особенность расположения продольных трещин:

- в плитах размером 3.5x3.5 трещины не обнаружены;
- на участках покрытий, имеющих размеры плит 7.5x7.5 и выше, образовались трещины вдоль краев плит. Ряд плит имеет одну-две волосные трещины, которые тяготеют к средней части плиты.

Теплопроводность тяжелого бетона изменяется в узких пределах 0.75-0.92 Вт/(м·°C) (в воздушно-сухом состоянии — 1,2 Вт/(м·°C)). Высокая теплопроводность — крупный недостаток тяжелого бетона при строительстве зданий и сооружений, но для покрытий аэродромов — это достоинство, обеспечивающее увеличение скорости выравнивания температуры по сечению плит покрытия.

Линейный коэффициент температурного расширения бетона составляет около 0,00001, следовательно, при увеличении температуры на 30°C расширение достигает примерно 0,3 мм/м (отметим, что данная величина сопоставима с усадочным эффектом, сопровождающим твердение бетона). Для снижения термических напряжений плиты покрытий большой протяженности разрезают швами шириной в несколько сантиметров на участки (в данном случае — 3,6, 7,6 и 15 м).

3. Характеристики расчетных моделей

Основные характеристики плит:

- размеры плит покрытия — $L_x = L_y = L$, $L = 3,6, 7,5$ м;
- толщина плиты — $h = 0,32$ м;
- класс бетона — В25; по прочности на растяжение при изгибе — $R_{bt} = 4,0$ МПа (≈ 40 кг/см²) (принятая величина в аэродромостроении); нормативная прочность в строительстве зданий и сооружений — $R_{bt,ser} = 1,6$ МПа (≈ 16 кг/см²);
- модуль деформации бетона — $E = 3,53$ МПа.

Армирование (если оно учитывается при моделировании):

- нижняя поверхность с защитным слоем — $a_1 = 4$ см;

- количество арматуры — 5 Ø 12 ($S_1 = 5,7$ см²/м; толщина слоя — $h_1 = 5,7 \cdot 10^{-2}$ см² (при армировании "слоями эффективной толщины")).

Плита уложена поверх существующего армоцементного покрытия толщиной 24-28 см через выравнивающий слой 10-15 см. На границах всех слоев при бетонировании нового покрытия уложена пленка.

Соединение плит покрытия с нижележащими слоями "старого покрытия" обеспечивается системой анкеров ("деформируемая длина анкера" $\approx 0,1$ м) Ø 14 с шагом по плоскости покрытия 0,8 м.

Основание составной армобетонной конструкции: уплотненный песчано-гравийный грунт + 2 слоя армобетона с суммарной толщиной 0,5 м.

Коэффициент постели как характеристика взаимодействия армоцементной части покрытия с грунтовым основанием $K_s = 75000$ кПа/м³, сдвиговыми напряжениями на границе контакта плиты с основанием пренебрегается (предполагается, что пленка на контакте между слоями практически полностью "снимает" касательные напряжения).

Приведенное значение коэффициента постели рассматривалось как минимально возможное. Реальное значение K_s с учетом существующего слоя бетона на грунтовом основании, поверх которого были уложены плиты покрытия, может быть большим.

4. Нагрузки и воздействия

Эксплуатационные нагрузки, обусловленные воздействием воздушных судов, не рассматривались.

В качестве основного сочетания нагружений рассматривалось действие веса тела совместно с нагревом до $T = 30^\circ\text{C}$ и перепа-

№	Нагрузка	Характеристика нагрузки	Величина	Коэффициент надежности, γ_f
1	Вес плиты	Постоянная	Удельный вес $\gamma_f = 24,5$ кН/м ³	1,1
2	Температурное воздействие	Временное		
	Изменение средних температур в сечении элемента относительно температуры замыкания		$T = 30^\circ\text{C}$	1,1
	Перепады температур по сечению элемента		$dT = \pm 15^\circ\text{C}$	1,1

дом температуры по сечению $dT = -15^\circ\text{C}$ (внешняя поверхность плиты охлаждена относительно нижней — охлаждение с поверхности после нагрева), приводящее к возникновению растягивающих напряжений в поверхностном слое плиты. Величина температурного воздействия определена с использованием норм проектирования СНиП 2.01.07-85* (применялась программа ВеСТ) для случая сооружения наиболее близ-

кого по особенности нагрева к армоцементной плите покрытия в соответствии с метеорологическими данными юга РФ для следующих условий:

Сооружение	
Тип сооружения при эксплуатации	Неотопляемые здания без технологических источников тепла и открытые сооружения
Конструкция здания	Железобетонные, бетонные, армокаменные и каменные толщиной от 15 см до 39 см
Защита от солнечной радиации	Нет
Поверхность	Горизонтальная
Коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности	0,5
Данные о месте строительства (юг РФ)	
Средняя температура января	5°C

Сооружение	
Среднемесячная температура июля	25°C
Географическая широта (град. с.ш.)	44
Отклонение среднесуточных температур от среднемесячных	5°C

	Нормативное значение	Расчетное значение
Изменение средних температур в сечении элемента		
зимой γ_{t_c}	-24°C	-26,4°C
летом γ_{t_w}	36,94°C	40,634°C
Перепады температур по сечению элемента		
зимой γ_{t_c}	0°C	0°C
летом γ_{t_w}	13,41°C	14,751°C
Коэффициент надежности по нагрузке		$\gamma_f = 1.1$

Температура замыкания плит неизвестна и может быть только оценена (принята $T_{\text{зам}} = 10^\circ\text{C}$). В качестве расчетного превышения температуры нагрева над температурой замыкания использовалась величина $T = 30^\circ\text{C}$.

Расчетный перепад температур по сечению плиты (летом $\gamma_{t_w} = 15^\circ\text{C}$) не может реализоваться при температуре замыкания: нагрев (или охлаждение) поверхности плиты неизбежно приведет к изменению и средней температуры нагрева сечений. Поэтому расчетный перепад температур по сечению может реализоваться при температуре, близкой к максимальной расчетной.

Расчетные характеристики температурного воздействия:

- температура замыкания — $T_{\text{зам}} = 10^\circ\text{C}$;
- сезон максимальных температурных нагрузок — лето, период максимальных температур;
- расчетное превышение температуры нагрева плиты над температурой замыкания — $T = 30^\circ\text{C}$;
- расчетный перепад температур по сечению плиты (летом $\gamma_{t_w} = \pm 15^\circ\text{C}$).

Обозначение нагрузений:

P — нагрузки, обусловленные весом плиты;

+dT — верхняя поверхность плиты имеет более высокую температуру, чем основание;

-dT — верхняя поверхность имеет более низкую температуру, чем основание;

dT = -16°C — рассматриваемое в качестве основного сочетание нагрузений действие веса тела совместно с нагревом до $T = 30^\circ\text{C}$ и перепадом температуры по сечению (внешняя поверхность плиты охлаждена относительно нижней — охлаждение с поверхности после нагрева), приводящее к возникновению растягивающих напряжений в поверхностном слое плиты.

5. Результаты расчетов. Используемые средства анализа и основные допущения

При анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) плит использовался расчетный комплекс SCAD Office (версия 11.3).

При моделировании плит покрытия применялись КЭ оболочки (№№ 44, 344), при моделировании контактного взаимодействия с грунтом — одноузловые элементы № 351.

Во всех случаях расчета моделировалось условие одностороннего контакта с основанием.

Рассмотрим процедуру "нелинейного расчета" — моделирование "отрыва" плиты от основания с использованием корректировки величины коэффициента постели.

Корректировка коэффициентов постели производилась в следующем простом итерационном процессе:

- шаг 1 — производился линейный расчет при комбинации нагрузений; вес плиты + температурное нагружение. В общем ряду параметров НДС определялись нагрузки на винклеровское основание плиты;

- шаг 2 — в элементах, в которых величина реакции основания (напряжения отрыва) $R_z > 0$, коэффициенты постели полагались равными нулю $K_s = 0$. Далее — к шагу 1.

Критерий выхода из итерационного процесса: отсутствие конечных элементов с $R_z > 0$.

5.1 Плита с размерами в плане 8.0x8.0 м

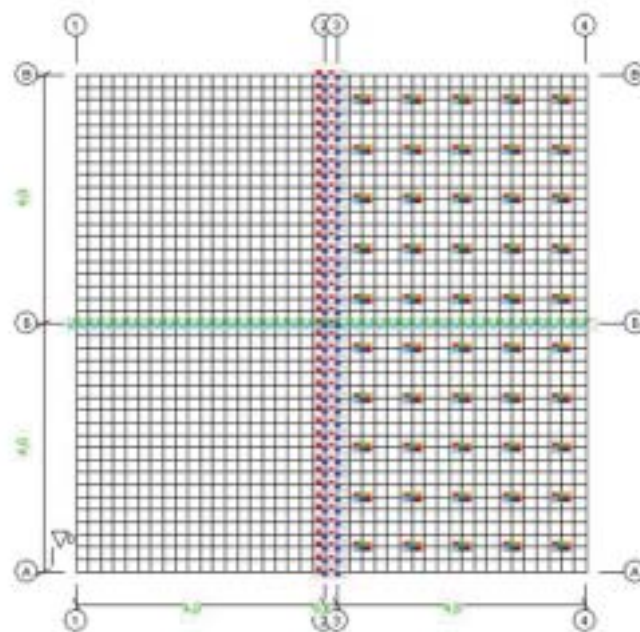


Рис. 1. Общая структура расчетной области

Фрагмент между осями 1-2 — плита без анкеров; между осями 3-4 — с анкерами: стальные стержни $\varnothing 14$ длиной $l = 0.1$ м (отдано предпочтение стержням по сравнению со связями конечной жесткости, поскольку система монтажа, на использование которой рассчитывали, не "работает" со специальными КЭ). По линиям 2 и 3 условия симметрии — $X = UY = 0$; по линии Б условие симметрии — $Y = UX = 0$ (для контроля корректности задания граничных условий симметрии).

В данном варианте анализируются качественные особенности деформирования плиты при температурной нагрузке.

Размер ячеек $\Delta x, \Delta y = 0.2 \times 0.2$ м.

Учитывая симметрию расчетной области, все данные приведены для нижних квадрантов плит.

5.1.1 Линейный контакт с основанием (без моделирования одно-стороннего контакта)

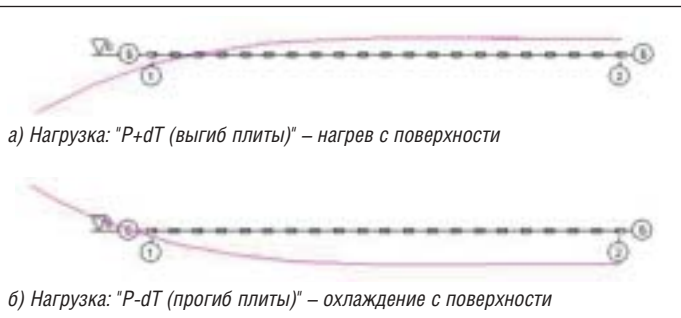


Рис. 2. Вертикальные смещения точек плиты. Нагрузка P+T; Линия Б-Б

Горизонтальные смещения краев плиты: линия 1, А, Б достигают величин 1.45 мм.

5.1.2 Распределение главных напряжений по поверхности плит

5.1.2.1 Нагрузка P+dT, упругое взаимодействие с основанием

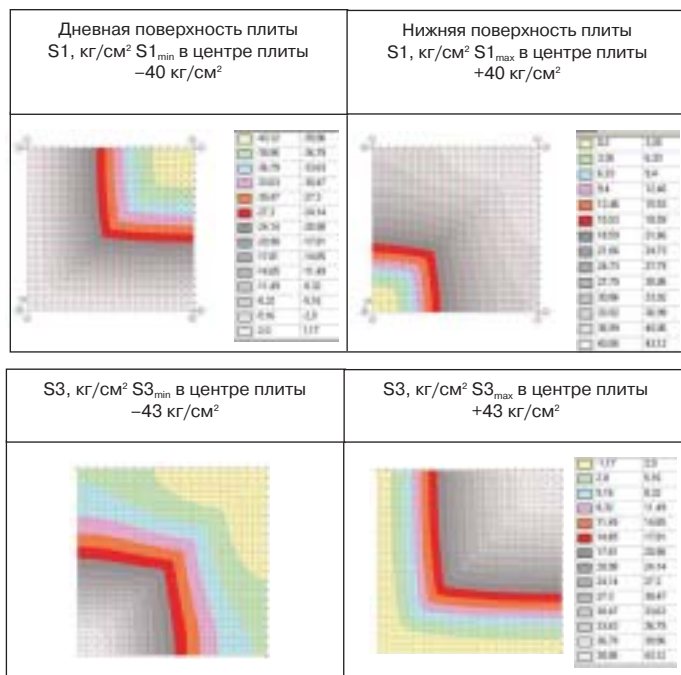


Рис. 3. Величины главных напряжений в плите покрытия

5.1.2.2 Нагрузка P-dT, упругое взаимодействие с основанием

Заметим, что при нагрузке P+dT в приповерхностном слое центральной части плиты отмечаются сжимающие напряжения, при P+dT – растягивающие. Нагрузка типа "dT" (выгиб плиты) не представляет интереса: трещинообразование подавляется существующей арматурой.

P-dT (прогиб плиты) более опасен, поскольку в поверхностном слое арматура отсутствует. Кроме прочности на растяжение бетона, не существует факторов, подавляющих процесс трещинообразования, поэтому в дальнейшем рассматривается именно эта комбинация загрузжения. Именно этот вариант расчета используется в качестве исходного состояния в итерационной процедуре, моделирующей "отрыв плиты от основания".

В данном случае расчет на действие веса плиты и температурные влияния в линейном приближении рассчитываются независимо друг от друга, а суммарный эффект представляет собой результат суперпозиции решений.

В случае упругого взаимодействия с основанием результаты

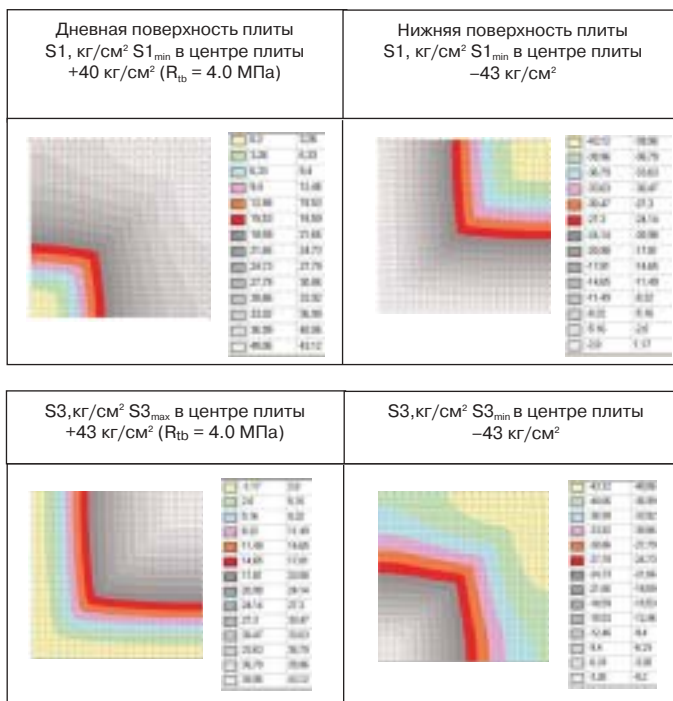


Рис. 4. Величины главных напряжений в плите покрытия

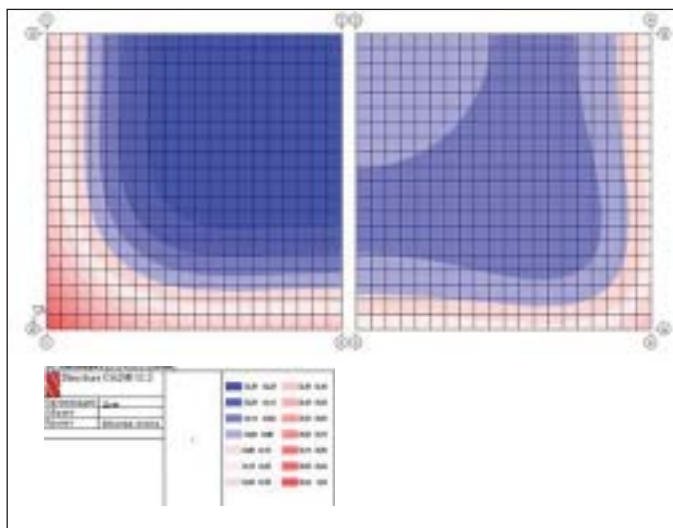


Рис. 5. Контактные напряжения R_z (кг/см²) в исходном состоянии. Нагружение P-dT. Синие тона – положительные (отрыв от поверхности контакта), красные – отрицательные. Левый фрагмент – без анкеров, правый фрагмент – с анкерами

расчета без учета отрыва плиты от основания позволяют получить оценку напряжений в плите, близкую к экстремальной.

На рис. 5 приведены значения контактных напряжений при нагружении P-dT. В первом шаге итераций во всех КЭ с $R_z > 0$ величина коэффициентов постели полагалась равной 0.

Учет одностороннего контакта на нижней поверхности плиты привел к снижению растягивающих напряжений в поверхностном слое до величин 7.62 кг/см².

5.2 Плита с размерами в плане 7.5x7.5 м

Проведем сопоставительный анализ деформации плиты с закреплением на опоре (влияние анкеров) с учетом "отрыва" плиты от основания.

Нагружение – в качестве критериального расчетного случая выбран приводящий к максимальным растягивающим напряжениям в верхнем слое плиты вариант: охлаждение с поверхности предварительно разогретой плиты T-dT.

На всех нижеприведенных диаграммах:

- левый фрагмент расчетной области — левая половина плиты с граничными условиями симметрии относительно плоскости xOz , заданными по правому краю фрагмента;
- правый фрагмент — симметричный левому. Дополнительно введены связи с постоянной жесткостью C в узлах модели с шагом 0.2 м, моделирующие анкерные связи с основанием.

Жесткость связей: при анкерах — арматура $\varnothing 14$ длиной $l_0 = (0.10 - 0.15)$ м, $E = 2.108$ кПа.

$E_F = E \cdot F / l_0 \approx (2000-3000)$ кН/м. Задано максимальное значение (3000 кН).

Граничные условия:

- по линиям 1-1 и 4-4 запрещались все перемещения, кроме X и Z ;
- дополнительно по линии Б-Б запрещалось перемещение вдоль Y .

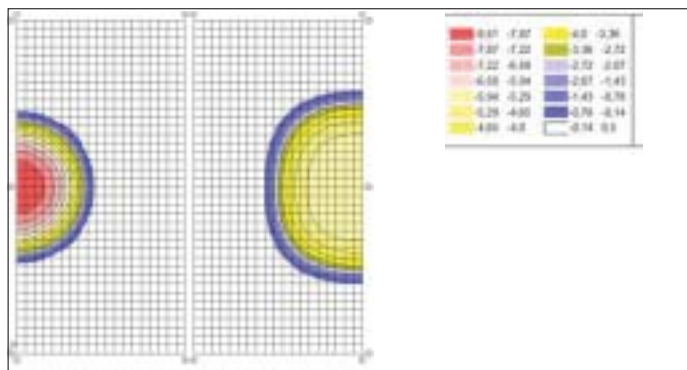


Рис. 6. Реакция опоры при воздействии P-dT. Расчетная схема.

Размер КЭ 0.2×0.2 м. Количество: конечных элементов — 1540, узлов — 1560

Обращает на себя внимание существенное влияние анкеров, расположенных между плитой и нижележащими слоями, на площадь опирания плиты и величину реакции R_z при совместном действии весовой и температурной нагрузок.

Сопоставление результатов расчетов двух фрагментов позволяет констатировать, что существует качественное влияние анкеров на вертикальные смещения. Например, для углов плит по линии А-А 2 (без анкеров) и 3 (с анкерами) оно составляет соответственно 5.11 мм и 3.1 мм.

5.3 Напряженное состояние плит

Ниже приведены величины главных напряжений σ_1 , σ_3 на верхних поверхностях плит (кг/см²).

Обращает на себя внимание тот факт, что максимум растягивающих напряжений отмечается в центре плиты и достигает величин:

- левый фрагмент — до 54 кг/см²;
- правый фрагмент — до 66 кг/см².

В плите без анкеров эта область имеет меньшие размеры.

Отметим, что для данной марки бетона величина напряжений образования трещин при изгибе составляет величину $R_{bt} = (48-50)$ кг/см².

Второе главное напряжение σ_3 имеет дополнительную особенность: наличие сжимающих напряжений в краевых областях верхнего слоя плиты. Отмеченная область существенна в плите "без анкеровки".

В среднем и нижнем слоях положительных главных напряжений (растягивающих) при анализируемом воздействии не отмечается.

Таким образом, процесс трещинообразования в приповерхностном слое средней части плиты в результате только термического воздействия является вероятным.

Наиболее значимыми факторами, влияющими на возможность образования трещин указанного типа, являются:

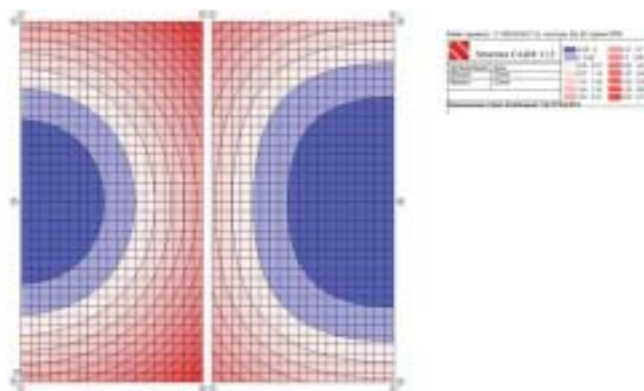


Рис. 7. Вертикальные смещения точек плит (мм) при совместном действии веса и температурной нагрузки

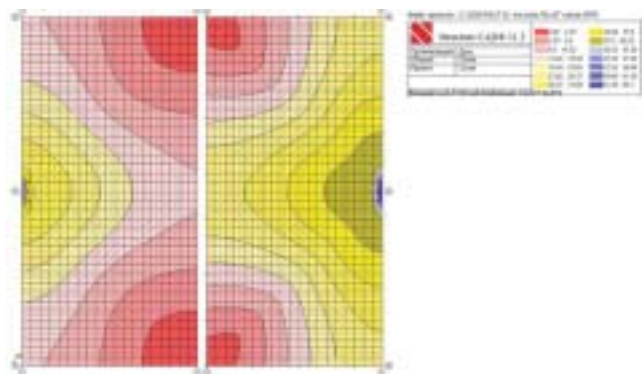


Рис. 8. Напряжения σ_1 (кг/см²) в верхнем слое плит. Красные отрезки в поле диаграммы — направления главных осей

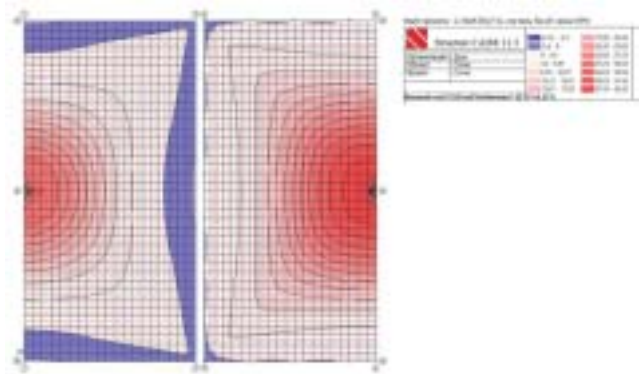


Рис. 9. Напряжения σ_3 (кг/см²) в верхнем слое плит. Красные тона — напряжения растяжения

- величина отрицательного градиента температуры (охлаждение сверху нагретой плиты) по сечению плиты;
- размеры плиты: при увеличении размеров плиты в плане и ее толщины вероятность возникновения трещин возрастает (в плитах размером 3.5×3.5 м в рассматриваемом варианте термического воздействия трещины не образуются);
- значимыми параметрами являются жесткостные и прочностные характеристики материала плиты и жесткости подстилающего основания;
- наличие вертикальных связей плиты с основанием (анкеровка с нижележащими слоями) может увеличить вероятность образования трещин в приповерхностных слоях плиты.

к.ф.-м.н. Сергей Буянов
ОАО "26 ЦНИИ",
к.ф.-м.н., д.т.н. Олег Кантур
ООО "ПКБ КАТРИЭЛЬ"