

ВЪВЕДЕНИЕ

Трактат за диференциалите и интегралите

Или: защо се предлага ИДУ за оценка на уморната дълготрайност при всякакво натоварване, включително многокомпонентно, непропорционално и нециклично.

Докъм 1600 г., т.е. до началото на 17-и век, хилядолетия наред човечеството е стояло на приблизително еднакво научно-техническо ниво. *Това е свързано с неразвитие на математиката.* Хората не са отишли много по-далеч от събиране, изваждане, умножение и деление, и от представите на елементарната геометрия, планиметрия и стереометрия.

Имало е все пак догадки за диференциално и интегрално смятане, раздробявайки един обем или площ на все по-малки части (също при търсене на център на тежест). Най-близо до идеята за диференциране и интегриране е стигнал в античността Архимед (около 287 – 212 г. преди Христа). Но в следващите две хилядолетия всяка отделна приложна задача относно площ, обем, център на тежест, плаване, лостове, прости инженерни съоръжения и т.н., се е решавала по специфичен, присъщ само на нея начин, при липса на общ математически подход.

Също така в механиката на движението все още не се е стигнало до идеята за скорост като функция-производна на преместване, интеграл от която е преместването; нито че ускорението е функция-производна на скорост (и че тъкмо то е пропорционално на сила). Променлива скорост, променливо ускорение, и изобщо променлива величина е оставала без ясно математическо дефиниране, защото е липсвала идеята за *дефиниране на променлива функция в безкрайно малък интервал (диференциал) на изменение на аргумента.* Така механиката е била в застой, а започвайки от нея, не се развива и физиката. За много от следващите научно-технически чудеса човечеството не е могло и да подозира преди 1600 г.: машините, електричеството, телефона, далекосъобщенията, радиото, телевизията, атомната енергия, космическите полети, космическите телекомуникации, компютрите ...

Какво всъщност се случва след 1600 г. с човешкото мислене, та само за четири века, в сравнение с хилядолетия застой, изведнъж се развиват много науки, които осъществяват гореизброените постижения?

Това, което се случва през 17-и век е, че *се прокарва идеята за безкрайно малките величини. Това е безкрайно голям скок на човечеството.* Човешкото мислене се пренастройва за търсене на връзки на диференциално ниво – между безкрайно малки диференциали на функции и аргументи. Осмисля се понятието (механична)

скорост като отношение на диференциал на преместване към диференциал на времето. Въобще отношението на диференциал на функция $dF(x)$ към диференциал на аргумент dx , т.е. $f(x) = dF(x)/dx$, наречено производна на функцията $F(x)$, придобива първостепенно значение. Човечеството се научава да диференцира – да намира производната и свързаните с нея диференциали. Производната е най-важната характеристика на изменението на една функция: тя е скоростта на това изменение. Същата получава и наименованията бързина, темп, стръмнина, интензивност, гъстота, напрежение и др. *Човешкият ум се научава и да интегрира – да сумира безброй многото безкрайно малки диференциали $dF(x) = f(x)dx$, за да получава интегралната (примитивната) функция $F(x)$.*

Нютон (Isaac Newton, 1642 – 1727) е баща на диференциалното и интегралното смятане. Другият основоположник е Лайбниц (Gottfried Leibniz, 1646 – 1716). От него идват окончателно оформени термините и означенията за диференциал, интеграл, производна, диференциално смятане, диференциално уравнение, координати, функция, алгоритъм, и др. [55]. Всеизвестна е знаменитата теорема (формула) на Нютон-Лайбниц за интегриране в определени граници от a до b :

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a). \quad (0-1)$$

Горната граница може да е също променлива (текуща). Ако тя се означи с x_{\max} , то

$$\int_a^{x_{\max}} f(x)dx = F(x_{\max}) - F(a). \quad (0-2)$$

Забележително в (0-2) е, че $F(x_{\max})$ е тъкмо примитивната функция $F(x)$ при поставяне на x_{\max} в ролята на x . Тази интерпретация е възлова за настоящия труд (раздел 2.3.1).

След фундаменталната теорема на Нютон-Лайбниц революционно се развива *общият и универсален математически път за получаване на търсени връзки между променливи величини – тъкмо като интегрални резултати от интегриране на връзки от диференциално ниво, при всякакви интеграционни условия*. В основата на всяка наука се залагат тъкмо диференциални връзки (уравнения), защото само така могат да се дефинират променливите-функции: разглеждат се като константи в рамките на диференциали на аргументите – пренебрегват се безкрайно малки от по-висок ред. Така например крива линия се заменя с начупена линия с прави, безкрайно къси отсечки; лице под крива линия се заменя със стъпаловиден полигон с безкрайно малки стъпала; стените на безкрайно малък (правоъгълен) паралелепипед от едно

деформируемо тяло се разглеждат като оставащи плоски въпреки депланирането на крайно големи плоскости на тялото; и т.н., и т.н.

Но основното предимство на залагането на връзки между диференциали в основата на всяка наука е следното: тези връзки са независими от условията на интегрирането, т.е. могат да се получават интегрални резултати при произволни интеграционни условия.

В пояснение на казаното нека се призове задачата за обем на тяло при произволна негова форма. Преди 1600 г. са правени най-често опити да се разчленяват телата на краен брой правоъгълни паралелепипеди с крайни размери a , b , c . От днешна гледна точка това може да се интерпретира така: *приспособяване* на решението $V = abc$ към различни интеграционни условия от различни форми на тела. Веднага ще последва препоръка да се направи интеграл от диференциали dV , представени например като $dV = z(x,y)dy \cdot dx$, където $y = y(x)$ е уравнението на контура на сечението на тялото с равнината $z = 0$. Методът е единен – метод на интеграла за получаване на обем; различни са само входните интеграционни условия, т.е. функциите $y = y(x)$ и $z = z(x,y)$ за различните по форма тела.

Още един (по-специализиран) пример: общият подход в механиката на деформируемото тяло е то да се раздробят на безброй много безкрайно малки (елементарни) правоъгълни паралелепипеди. На такова диференциално ниво се “хващат” връзките (диференциалните уравнения) между диференциалите на напреженията, деформациите и деформационни премествания на един елементарен паралелепипед. Интегрира се по всички елементарни паралелепипеди при *произволна форма на тялото и произволно натоварване*.

Става ясно, че *ако в някое научно направление не е прилаган диференциално-интегралният подход, няма да има единен, общопризнат и универсален метод в обща постановка на условията на задачата, т.е. при произволни интеграционни условия*. Вместо това ще има: стотици предлагани методи в частни постановки, т.е. индивидуални резултати при условия, които биха били частни интеграционни условия, ако се интегрираше; стотици опити да се пренасят частни решения към по-високо ниво на обобщение – всъщност опити да се приспособяват по индуктивен път резултати от по-прости интеграционни условия към по-сложни; хиляди написани трудове, плод на разпиляващи се усилия.

Не всяка задача за интегриране, респ. за диференциални уравнения, е решима аналитично – зависи от сложността на уравнението и на интеграционните условия. Но в последно време, благодарение на масовата компютъризация и създаване на нови и нови видове софтуер, се наложи численото интегриране. Диференциалите се заменят

с достатъчно малки крайни разлики, безкрайно малките елементи – с крайни. Съответно, ако преди време в някои задачи е било немислимо аналитично интегриране при произволни интеграционни условия, и заради това не е бил прилаган универсалният математически подход от диференциали към интеграли, то в днешно време не е проблем интегрирането да стане числено, с компютър. Следователно, ако в някое научно направление са се развили методи без диференциали и интеграли, би трябвало натрупаният опит да се пренасочи към диференциално ниво и числено интегриране от него. Това може да развие революционно научното направление по същия начин, както диференциалното и интегралното смятане разви революционно математиката и оттам свързаните с нея всички съвременни точни науки.

Сега вече може да се отговори на въпроса защо се предлага ИДУ за оценка на дълготрайността при умора при общо (всякакво) натоварване: защото тъкмо за тази цел не е прилаган общият дедуктивен математически път от диференциали (на умората) към интеграл, тъкмо при общи (всякакви) интеграционни условия (на натоварването). Вместо това се е тръгнало индуктивно от частни решения към приспособяването им и в по-обща постановка, разпиляно по много начини, без да се стигне до единен общ метод. Да се случи така е било обусловено исторически и технически (още са липсвали бъдещите компютри). Но сега е вече крайно време да се процедира с диференциали на умората и тяхното числено интегриране.

Ретроспекция на ИДУ

За вземане на точно отношение към предлагания ИДУ-метод не е без значение да се знае как е възникнал той, как се е развивал и как е посрещан. Същевременно изложението по-долу е част от литературното проучване и въведението в ИДУ.

Авторът завърши Техническият университет (тогавашния ВМЕИ) – София в 1972 г. като машинен инженер, благоговеейки пред диференциално-интегралния подход. Логично последва едногодишната следдипломна специализация по приложна математика в новосъздадения блок “Б” на ВМЕИ. Идеята за образуването на този блок беше на хора, които вярваха, че инженерите с математическа наклонност и повишена математическа подготовка ще дават повече тласък на инженерните науки. С такава настройка от блок “Б” авторът започна през 1976 г. редовна докторантура в катедра “Съпротивление на материалите”, в направлението дълготрайност при умора на материалите. Научният ръководител беше тогавашният ръководител на катедрата проф. Петър Левчев Ганев.

След направеното литературно проучване се установи, че никой не е търсил дълготрайност чрез интеграл от диференциали на умората. В основата на

направлението уморна дълготрайност е емпиричната зависимост, известна като крива на умора (на Вьолер – August Wöhler, 1819 – 1914). Всички следващи изследвания са главно върху нея. Тя е експоненциална зависимост между σ_a и N , където σ_a е амплитудата на синусоидално циклично променливо напрежение $\sigma(t) \equiv \sigma_x(t) = \sigma_a \sin \omega t$, а N е брой цикли до настъпване на умора.

От гледна точка на ИДУ кривата на умора, т.е. емпиричната връзка $N = N(\sigma_a)$, може да се разгледа като интегрален резултат от сумирането на диференциали на умората при диференциали на напрежението (натоварването) $d\sigma$, реализирани за диференциали на времето dt . Интеграционното условие за този резултат е един прост, частен случай на циклично изменение на σ във времето. *Никой обаче не е погледнал върху кривата на умора тъкмо от тази гледна точка.* Съответно не е поставян въпросът за диференциала $d\sigma$, с който да се свърже диференциал на умората, и от интегрирането на такива диференциали при условието $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$ да произлезе Вьолеровата зависимост $N = N(\sigma_a)$. Ако това беше направено, веднага щяха да последват интегрирания и при всякакви други нециклични (непериодични и несинусоидални) осцилограми $\sigma(t)$. Вместо това се случва друго: когато след Вьолер възниква належащият въпрос как да се прогнозира дълготрайност при произволна, нециклична (непериодична, детерминистична или случайна) осцилограма $\sigma(t)$, започва приспособяване на интегралния резултат от случая $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$.

С други думи, всички изследователи се насочват към търсене на цикли с различни амплитуди $\sigma_{a,i}$ в нециклична осцилограма $\sigma(t)$. Същата се заменя с последователност от цикли с амплитудите $\sigma_{a,i}$ и се говори за натоварване с променлива амплитуда. По-нататъшното приспособяване към кривата на Вьолер се развива по начин, както следва. За един цикъл със $\sigma_{a,i}$ се приема, че настъпва т.нар. относително уморно повреждане $1/N(\sigma_{a,i})$, където $N(\sigma_{a,i})$, означавано по-кратко с N_i , се отчита от кривата на Вьолер. Ако все този цикъл се повтаря до разрушаване, същото ще настъпи след N_i цикъла и натрупваното сумарно относително уморно повреждане (Damage) $D_\Sigma = \Sigma(1/N_i)$ ще достигне пълната си стойност 1 (т.е. 100 %). Тогава $n_i < N_i$ повторения на $\sigma_{a,i}$ следва да внесат повреждане $n_i \cdot (1/N_i) = n_i/N_i$. Като се сумират такива повреждания n_i/N_i за различните (групирани) амплитуди $\sigma_{a,i}$, то дълготрайността ще се определи от условието $\Sigma(n_i/N_i) = 1$.

Такъв подход (раздел 1.3) е започнал да се прокарва през 20-те години на XX век по подобна идея на Палмгрен (Palmgren) [138] и се развива от Майнер (Miner) [129] през 40-те години. Затова определянето на дълготрайността така, че да се получи

$\Sigma(n_i/N_i) = 1$, се нарича правило на Майнер (или на Палмгрен-Майнер). И понеже в духа на горния трактат става дума за приспособяване на интегрален резултат (кривата на Вюлер) от частно интеграционно условие $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$ към произволно условие $\sigma(t)$, вече е ясно, какво става по-нататък: предлагат се много методи за откриване и броене на цикли в нециклична осцилограма, т.е. за т.нар. схематизация или декомпозиция на същата. В последните десетилетия най-популярен е методът Rain-Flow [76] [84] (и много други публикации). Той е стандартизиран в много държави, включително и в България [1]. Може да се преведе като метод на “дъждовния поток” или “дъждовното стичане”, а в БДС 17076-89 [1] заляга преводът “метод на стичащия се дъжд”.

Освен метода на дъждовното стичане в Европа има и стандарт Eurocode 3:1993 („Метод на резервоарите”), който от 01.01.2010 г. действа и в България (бележка от доц. д-р Л. Лазов от предварителното обсъждане на настоящия труд на 21.06.2011 г.).

Преди времето на компютрите и цифровото преобразуване на аналогови осцилограми са се създавали електронни т.нар. класиращи апарати.

В противовес на всичко това, следвайки споменатата настройка към диференциали и интегрални, се направи обръщение към изконния математически запис $dF(x) = f(x)dx$. Аналогично и просто бе постулирано $dD(\sigma) = R(\sigma)d\sigma$. Тук $D(\sigma)$ е относително уморно повреждане, което при изменение на текущо (моментно) σ с $d\sigma$ претърпява диференциал $dD(\sigma)$ (диференциал на уморното повреждане или, по-просто, диференциал на умората). $R(\sigma)$ е производна на $D(\sigma)$ и като такава представлява интензивност на уморното повреждане. Съответно $D(\sigma)$ е примитивната функция на интензивността $R(\sigma)$. Когато се интегрира $dD(\sigma) = R(\sigma)d\sigma$ при интеграционното условие $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$ за един цикъл, т.е. за период T , получава се относително уморно повреждане за един цикъл. То е $1/N(\sigma_a)$ – представя се от една точка от кривата на умора. Обратно: като се диференцира подходящо този конкретен интегрален резултат $1/N(\sigma_a)$, ще се получи производната $R(\sigma)$ – както $f(x)$ в (0-2) се получава при диференциране на $F(x \equiv x_{\max})$.

Така намирането на интензивността $R(\sigma)$ на относителното повреждане (и слизането на диференциалното ниво на това повреждане) може да стане чрез подходящо диференциране на конкретна интегрална функция $1/N(\sigma_a)$, представяна от кривата на умора. След това може да се интегрира $dD(\sigma) = R(\sigma)d\sigma$ при произволна осцилограма $\sigma(t)$. При това не е нужно осцилограмата да се схематизира предварително, т.е. не се налага търсенето и броенето на цикли в нея, което се е вършело и се върши от няколко десетилетия. Това е коренно различна идея за

използване на крива на умора от циклични натоварвания за оценка на дълготрайност при произволно нециклично натоварване.

Дотук ставаше дума за едно напрежение σ , т.е. за едномерно напрегнато състояние, респ. за еднокомпонентно натоварване. Развиващата се инженерна практика поставя по-нататък през XX век въпроса за уморната дълготрайност и при сложно повърхнинно напрегнато състояние – когато освен $\sigma(t) \equiv \sigma_x(t)$ се намесват също $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t)$. В случай че трите осцилограми $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t)$ варират пропорционално, натоварването е равностойно на еднокомпонентно. То се описва пак с един променлив параметър. Ако същият се означи с s , пак става дума за една-единствена осцилограма $s = s(t)$. Отново може да се използва една крива на умора. Следващият въпрос е, че в общия случай многокомпонентното натоварване е непропорционално, с три най-различни осцилограми $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t)$.

Как са започнали изследователите да търсят дълготрайност при многокомпонентно непропорционално натоварване? Пак в духа на предния трактат, очаквано е това, което е станало (раздел 1.4): след като не са дефинирани диференциали на натоварването и на умората в този общ случай и не се интегрира при произволни трикомпонентни интеграционни условия $\sigma_x = \sigma_x(t)$, $\sigma_y = \sigma_y(t)$ и $\tau_{xy} = \tau_{xy}(t)$, започват да се създават многобройни методи. И ако за еднокомпонентно натоварване са предлагани десетки критерии, то за двукомпонентно и трикомпонентно натоварване броят им се увеличава от порядъка на втора и трета степен. Става твърде сложно, щом се правят опити по индуктивен път да се обобщават някакви резултати от еднокомпонентно натоварване към дву- и трикомпонентно. Тези опити изискват определени концепции (теории) за уморната еквивалентност между многокомпонентно непропорционално и еднокомпонентно натоварване, съответно за редуциране на многокомпонентност на натоварването. Възникват много концепции (някои от които са изложени в раздел 1.4) и съответно много концептуални проблеми.

Докато, ако се интегрира уморното повреждане от диференциално ниво на сложното напрегнато състояние, директно при произволни осцилограми $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t)$, отпада всякаква необходимост от редуциране на многокомпонентността, наред с отпадането на всякаква необходимост да се търсят и изброяват цикли. Споменатите концептуални проблеми не възникват.

Как обаче да се дефинира диференциал на натоварването (означаван с ds) при три компоненти $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t)$? При само една компонента $\sigma(t) \equiv \sigma_x(t)$ диференциалът ds е съвсем прост според по-горе – той е $d\sigma$. Но при три компоненти дефинирането на ds съвсем не е просто: трите напрежения са тензорно зависими

(вариантни) от избора на осите x и y . Така че *трябва да се реши първо въпросът как да се образува трикомпонентен диференциал ds на натоварването, независим от x и y . Следващият въпрос: при дефиниран ds , как да се образува диференциалът dD на уморното повреждане?*

Тези въпроси бяха истинско предизвикателство към авторската настройка от блок "Б" (и след натрупан опит в алгоритмизиране и програмиране в изчислителен център). Въведе се терминът *траектория* за пътя, описан в координатната система σ_x - σ_y - τ_{xy} . Очевидно е, че с отдалечаване на текущата точка на траекторията от координатното начало расте интензивността на повреждането. Тогава е близо до ума да се асоциира натрупващото се повреждане с натрупване на (криволинеен) интеграл по траекторията: същата се състои от безкрайно къси отсечки, които са всъщност диференциали ds . При всеки ds ще се прибавя диференциал на повреждането dD с някаква интензивност, която бързо расте с нарастване на σ_x , σ_y и τ_{xy} . Но траекторията в тези координати σ_x - σ_y - τ_{xy} е, както се разбира, тензорно *вариантна*, т.е. коренно се променя, ако се изберат други оси x и y . Тогава следва да се отиде на *инвариантна* траектория – на главните напрежения σ' и σ'' , т.е. да се разглежда равнинната траектория в координати σ' - σ'' . Но така би се изгубило въртенето на главните направления ' и ". Как да се отчете то?

В крайна сметка на вниманието на ръководителя проф. Ганев и на катедрата бе предложен трикомпонентен диференциал ds в координатна система ε' - ε'' - $d\gamma$, където ε' и ε'' са главните деформации, а $d\gamma$ е диференциал на ъглова деформация. Обръщането към деформации вместо към напрежения беше повлияно от проф. Ганев, който търсеше приложение на открития от него т.нар. деформационен хистерезис [7]. Идеята за ds в координати ε' - ε'' - $d\gamma$ остава същата и в координати σ' - σ'' - $d\tau$, както е в настоящия труд (раздел 2.1).

Ръководителят и катедрата показаха голям интерес към дефинирания диференциал ds . Трикомпонентното натоварване можеше вече да се представи като съвкупност от диференциали ds . Те се формират всъщност като достатъчно малки и достатъчно много крайни разлики. Съответно методът ИДУ се оформи като числен, осъществим само с помощта на електронноизчислителна машина (ЕИМ). Между другото, заради необходимостта от ЕИМ, методът ИДУ не би могъл да възникне за практическо приложение по-рано (например преди 1970 г.). Бе улучено началото на масовата компютързация и произтичащата възможност за числено диференциране и интегриране в голям обем. И в други научни направления на тази основа вече се

развиваха немислими по-рано методи, за да се стигне до съвременните видове софтуер за моделиране чрез крайни елементи.

Пак между другото, специално при еднокомпонентно нециклично произволно натоварване не е имало технически пречки пред метода ИДУ да се прилага (вместо търсене и броене на цикли) далеч по-рано, още в началото на XX век. При такова натоварване може да се интегрира и без компютър (в раздел 2.3 се показва как).

Идеята за ds и направеното вече първо програмиране за ЕИМ се публикуваха [14] през 1978 г. Това е регистрираното начало на метода ИДУ (наименованието ИДУ се възприе през 2009 г., както става дума по-долу; преди беше „метод на интеграла“). След ds се постулира и диференциалът на повреждането dD – най-напред по най-простия начин от по-горе: $dD(s) = R(s)ds$. Това бе хипотеза, че може да се използва една и съща интензивност на повреждането $R(s)$ [13] (1979 г.) при различни интеграционни условия. Това се потвърждаваше в координатната система $\varepsilon'-\varepsilon''-d\gamma$ при използване на чужди, а впоследствие и на собствени експериментални данни [34] при непропорционални огъване и усукване. Много усилия отидоха за правенето на програми за тогавашните ЕИМ, чрез които методът можеше да работи, и за създаването на стенда [34] [41] за добиване на собствените експериментални данни. Дисертацията [41] беше защитена успешно през 1980 г.

Ръководителят предвиждаше голямо бъдеще за ИДУ, в съчетание с входни криви на умора, получени ускорено по метода на деформационния хистерезис [7]. Той издейства оставане на автора на работа в катедрата като научен сътрудник. Започна пропагандиране на метода на интеграла в България [10] [38] и в бившия Съветски съюз [11]. Проф. Ганев имаше голям авторитет и влияние (главен научен секретар на ВАК). За нещастие, той заболя през 1984 г. и почина през 1985 г. Последва преподавателска кариера на автора в Лесотехническия университет – София, с научна работа в други направления. Развитието на метода на интеграла спря до хабилитиране през 1991 г.

По това време България се отвори към света и авторът се върна към метода с цел да го пропагандира на международно ниво. Изглеждаше, че самата идея да се сумират директно диференциали на уморно повреждане при всякакво натоварване, без да се търсят цикли и/или да се редуцира сложността (многокомпонентността) на напрегнатото състояние, ще се посрещне със същото уважение и поощрение, както преди това в катедра “Съпротивление на материалите”. Въвеждането на диференциали на умората и на интеграл от тях изглеждаше да има за научното направление уморна дълготрайност същото революционно значение, каквото има въвеждането на диференциали и интегрални в математиката и оттам в другите точни

науки. Очакваше се, че методът на интеграла веднага ще се подеме от световните авторитети и институции в научното направление.

През 1993 г. се осъществи двумесечно посещение в един от европейските центрове по изследване на умората – института IMAV на проф. Ценер (Zenner) в Клаустхал, Германия. Проф. Ценер, един от тогавашните световни авторитети по умора на материалите, и останалите колеги там показаха интерес към метода на интеграла. Но те само пожелаха успех в развитието му: институтът си имаше своята собствена научна програма и финансиране, и всеки колега си имаше своето “задание”.

Междувременно, заради широкото разпространяване на персоналните компютри, авторът беше в процес на трудоемко препрограмиране на метода, с вмъкване и на графичен режим. Алгоритъмът не е лесен (както ще се види в глава 4) и изискваше много усилия. Тестванията, откриването на неизбежните програмистки грешки и тяхното изчистване костваше дългогодишна напрегната работа (от само един човек).

Стигна се до успеха да се направят четири публикации [169] [170] [171] [176] в *Int. J. Fatigue* (международното специализирано списание по умора на материалите) в периода 1993 – 1997 г. Всяка от публикациите костваше едногодишно усилие. Рецензентите проявяваха резервираност към непознатия автор от България, който се опитваше да изложи нещо нетрадиционно. Четвъртата публикация [169] бе посветена на интересния частен характеристичен случай на натоварване, когато главните направления се въртят, но главните напрежения по тях остават постоянни (раздели 2.6.3 и 2.6.4). Този случай бе разкрит благодарение на ИДУ и се изтъкваше, че е оставал незаслужено незабелязан; че е много важен, защото е “максимизиран” случай. Редица критерии за дълготрайност би трябвало да се апробират при това натоварване и да се провери валидността им. Тогава много от тях биха се провалили.

След тази четвърта публикация списанието *Int. J. Fatigue* не допусна за печат представена пета статия. В нея открито се поставяше въпросът, че целият световен опит по оценка на уморна дълготрайност би трябвало да се пренасочи към зависимости на диференциално ниво, откъдето да се интегрира свободно при всякакви натоварвания като единен метод. Отхвърлена беше и друга статия: “Прогнозиране на уморна дълготрайност чрез интеграл без броене на цикли”. Ставаше очевидно, че методът на интеграла не се приема от създателите и поддръжниците на съществуващите и утвърдени (включително с държавни стандарти) „циклови” методи.

Но по-нататък, вече на регионално ниво в България, статията “Прогнозиране на уморна дълготрайност чрез интеграл без броене на цикли” бе приета и публикувана в списанието *Theoretical and Applied Mechanics* на БАН [165].

Междувременно проф. Евалд Маха (Ewald Macha) от Техническия университет в Ополе, Полша, прояви интерес към метода на интеграла. Това бе стимул за образу-

ване на колектив с ръководител автора и с участието на проф. Маха и негови полски сътрудници за “Развитие на метода на криволинейния интеграл за прогнозиране на уморната дълготрайност при многокомпонентно непропорционално произволно (случайно) натоварване”. Под това заглавие се сключи договор ТН-545/95 между НИС на Лесотехническият университет и Националния фонд научни изследвания. Отпуснатите финансови средства бяха минимални и се обезценяваха бързо при тогавашната действителност в страната. Получи се и конфуз в отношенията с полските колеги: те предоставиха осцилограми, в които графичният режим на програмите на автора откри паразитни импулси. Ставаше дума за огромен експериментален материал. Авторът създаде допълнителен софтуер, който изчистваше („бръснеше“) осцилограмите от импулсите [45] [46]. Но полските колеги предпочетоха да се оттеглят от сътрудничеството (също защото ИДУ провокира въпроса доколко е правилна концепцията на техен метод).

Друг стимул се появи в лицето на проф. Де Маре и негови сътрудници от Швеция. Оказа се [103] [104] [182], че те също са стигнали, независимо и по-късно, до възможност да прогнозираят уморна дълготрайност при една осцилограма само, използвайки не амплитудни, а текущите (моментните) ординати на осцилограмата – както е по метода на интеграла. Съответно и те са дефинирали интензивност на повреждането, макар и да не я наричат така: тяхна функция $g(s)$, която в частния случай на нулево статично ниво на осцилограмата съвпада с ИДУ-интензивността $R(s)$. Те не бяха тръгнали от идея за диференциали на натоварването и на умората и съответно не повдигаха въпроса за интеграл от такива диференциали.

След осъществяване на връзка проф. Де Маре изпрати покана и финансово осигури научно посещение на автора в Швеция с участие на конференцията “Статистически методи при умора на материалите”, 1998 г. Бе представен доклад [164], в който в резюме се изложи методът на интеграла и се посочи пресечната му точка с модела на шведските автори. Призова се към обединяване и сътрудничество за нов подход към прогнозиране на уморна дълготрайност, започвайки от диференциално ниво. Но в крайна сметка шведските колеги не показаха намерение да глобализират метода си до нещо повече от руслото, в което го развиват.

Все по-очевидно ставаше това, че дали методът на интеграла е наистина правилният нов подход, е само едната страна на проблема. Другата страна е, че неговото евентуално глобално приемане би означавало колегите по света да преоценят, пренастроят, или да се откажат от свои концепции, чрез които са израснали професионално и чрез които се обезпечават финансово. Следователно, обяснимо е проявяваното резервирано отношение или дори предварителна негативна настройка. По друг начин би се посрещнал един нов глобален подход, ако той се представи пред

света от водещ учен-светило в научното направление и от мощна финансова организация. Авторът почти стигна до отказ от по-нататъшни опити.

През 1998 г. се реализира втора двумесечна специализация в Германия, пак в института на проф. Ценер. Бе установен контакт и с университета в Брауншвайг, където също бе изнесен доклад. Отново не се намериха трайни ИДУ-последователи.

В периода 1999 – 2003 г. авторът бе в САЩ над две години и половина; през 2002 – като гост-преподавател в техническия университет ИТ (Illinois Institute of Technology) в Чикаго, катедра “Машинознание, материалознание и авиационно инженерство” (ММАЕ – Mechanical, Materials and Aerospace Engineering). Опитите да се ангажира катедрата ММАЕ и американски колеги от други места в проект, свързан с метода на интеграла, също не дадоха резултат: колегите любезно отклоняваха ангажимента, обосновавайки се със заетостта си по своите научни задачи.

Така последва ново прекъсване в работата по ИДУ. Впоследствие се разбра, че методът е станал известен и се дискутира по света [62] [63] [99] [102] [107] [144] [145] и др. Имаше го признанието [63], че това е концепция далеч извън обхвата на предишните подходи. Имаше и забележки. Това още повече показваше, че работата трябва да продължи, да се търсят сътрудничество и последователи, а също и да се намеси процедура по публична защита на ИДУ като допълнителен начин за ангажиране на вниманието и оценката на повече хора.

Отново се появи стимул в лицето на докторант на автора – гл. ас. Боян Стойчев от катедра “Техническа механика” в ТУ – Габрово. Започна съвместна работа във връзка със създавана изпитвателна машина за въртеливо огъване, комбинирано с постоянно усукване [179], по авторова схема [39] [40] (раздел 1.4.6). От получените експериментални данни произлезе успешна верификация на ИДУ (глава 5).

През 2006 г. се създаде сайт на ИДУ (<http://MetodNaIntegrala.hit.bg>), който непрекъснато се поддържа и разширява и до днес. В него методът се популяризира на български език. Този труд също се излага там, наред с компютърни програми и файлове. Излага се и том II – разширения, допълнения, подробности, и др. Към ИДУ-сайта се правят отправки за всичко, което принадлежи към настоящия труд или е негово продължение, но не може да се включи в него заради ограничения му обем.

На английски методът е с абривиатура IDD (Integration of Damage Differentials). Съответно, създаде се и IDD-сайт (<http://www.freewebs.com/fatigue-life-integral>) на английски, наред с ИДУ-сайта. IDD-сайтът, също поддържан и развиван и до днес, се превърна в основно средство за популяризиране на IDD в чужбина и за установяване на контакти с много колеги по света.

В резултат на това се установи сътрудничество с д-р Ян Папуга (Jan Papuga) и негови колеги от Чехия. Той е млад учен, който има настояще и бъдеще на световен

капацитет по умора на материалите, главно заради създаден от него сайт-портал: <http://www.pragtic.com/>. Там се излага амбициозен проект, наречен Праг-Тик (PragTic Project) с голяма база данни за умората, с изложение на много методи и софтуер, с комуникация в образувана Праг-Тик научна общност, с форум, с провеждане на ежегодни Праг-Тик конференции, и т.н. На своя сайт д-р Папуга провъзгласи интегрирането на диференциали на уморното повреждане без формиране на цикли като революционна идея (http://www.pragtic.com/docu/PragTicA_Intro.pdf, стр. 9).

От сътрудничеството с д-р Папуга произлезе работата [174], докладвана на международна конференция в Дармщадт, Германия. Тогава се предложи и се прие аббревиатурата IDD (ИДУ) като по-подходящо наименование. Докладваните оценки на дълготрайности при еднокомпонентни случайни натоварвания по предлагания ИДУ-метод, т.е. без използване на очакваната схематизация по метода на дъждовното стичане, се оказаха възможно най-точни (раздел 3.3).

През лятото на 2009 г. се осъществи трето двумесечно научно посещение в Германия, този път в Дармщадт, във Фраунхофер-института за експлоатационна якост и надеждност LBF (Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF), по покана на проф. Зонзино (С. М. Sonsino). Той е един от водещите учени по умора на материалите. Благодарение на него и на интереса му към ИДУ това посещение се оказа много плодотворно. Написа се [168] (70 страници), с участието на директора на LBF проф. Ханзелка (Н. Hanselka) и проф. Зонзино. Институтът LBF ежегодно публикува свой т.нар. отчет – в случая [168] за 2009 г., който прие характер на монография върху ИДУ. Подготвени бяха и статиите [167] и [175], посветени на верификации на ИДУ, с участието на още колеги от LBF.

Активността чрез IDD-сайта и интересът към ИДУ доведоха до включване на автора в научния комитет на конференцията ICMFF9 (The Ninth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture – деветата международна конференция по умора и разрушение при сложно напрегнато състояние), Парма, Италия, 7 – 9 юни, 2010 г. (<http://www.icmff9.unipr.it/>). Тази конференция се провежда веднъж на три години. Тя събира най-известните учени по темата и представлява най-подходящият форум за ИДУ. Авторът участва активно в конференцията и изнесе „поканен“ доклад (invited paper) – статията [166]. Предизвикаха се дискусии и ангажиране на вниманието на аудиторията на ICMFF9 върху IDD. В сборника с трудовете от конференцията се включиха още статиите [167], [175] и [178].

В лицето на съпредседателите на ICMFF9 проф. Андреа Карпинтери (Andrea Carpinteri) от университета в Парма и проф. Зонзино авторът срещна дългоочакваното признание и подкрепа за значимостта на IDD. По тяхна инициатива дойде и покана за IDD-публикация в специално издание на *J. Fatigue* 2011, посветено на ICMFF9. Всичко

това се превърна в основание за завършване и представяне на настоящия труд.

На вниманието на изучаващите предлагания метод

Очаква се, че изучаващите и оценяващи настоящия труд ще вземат отношение по него в следната последователност на (не)признаване на: 1 – новото научно направление – концепцията ИДУ, възникнала в България; 2 – предложението за диференциал на уморното натоварване ds за общия случай на натоварване (напрягане); 3 – предложението за общия случай интегранд dD , заедно с банка емпирични данни за участващи в него ИДУ-параметри.

По пункта 1 тук се изразява твърда убеденост, че ИДУ като концепция е непременно нужна (независимо от това дали е реализирана по предлагания метод или по-възможен бъдещ по-добър метод). Нещо повече: предишната липса на ИДУ като концепция е математически пропуск на изследователите по уморна дълготрайност. ИДУ пренася основната идея на диференциалното и интегралното смятане – за интегриране от диференциално ниво при произволни интеграционни условия – в случая при произволни вариации на компонентите на уморното натоварване. По този начин концептуално и универсално се решава най-важният въпрос за оценката на уморната дълготрайност – влиянието на различните видове натоварвания. Нютон и Лайбниц биха приветствали този подход.

По пункта 2, т.е. по въпроса за дефиниране на диференциал ds , се счита, че е реализирано едно определено постижение, и че липсата на такава дефиниция преди може също да е причина за липсата и по пункта 1. Логиката на предложената дефиниция на ds (раздел 2.1) изглежда единствената възможна. Всеки друг изследовател може да опита да формулира различен диференциал на натоварването. Ако не успее, то предлаганият тук ds ще се утвърди като единствения възможен.

По пункта 3: предложението (в раздел 2.7) интегранд dD , т.е. авторовият метод ИДУ, работи успешно. Това се потвърждава от направените верификации в глава 5. В предлагания метод и софтуер за ИДУ се използват емпирични ИДУ-параметри, означавани с f_c , f_b , N_c и N_b ; f_c и f_b се наричат коефициенти за (чувствителност на материала към) непропорционалност на натоварването; числата N_c и N_b служат за формиране на области на неповреждане в равнината $\sigma'-\sigma''$, валидни при непропорционалност на натоварването. Методът работи със задоволителна точност, съответстваща на сегашния етап на овладяване на параметрите f_c , f_b , N_c и N_b , и на фона на твърде многото съществуващи и противоречащи си методи.

Още по представянето на метода може да се види в „Начало” на ИДУ-сайта.