

ZÁVĚREČNÉ VÝSTUPY PROJEKTU TH02020565 PRO STANOVENÍ VHODNÝCH PARAMETRŮ PRO OBNOVU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORŮ TYPU VVER 440 METODOU REGENERAČNÍHO ŽIHÁNÍ

FINAL OUTPUTS OF THE TH02020565 PROJECT FOR DETERMINATION OF SUITABLE PARAMETERS FOR RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF WWER 440 REACTOR INTERNALS MATERIALS BY THERMAL ANNEALING METHOD

Ivana Schnablová ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Ondřej Buršík ^{a)}, Kateřina Rusňáková ^{a)} a Aleš Materna ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

V návaznosti na současný trend prodloužování životnosti průmyslových komponent jsou kromě inovativních zkušebních metod pro stanovení mechanických vlastností průběžně vyvíjeny a modifikovány další metody, jejichž aplikace na konstrukční materiály může mít znatelný přínos v procesu prodloužení životnosti provozovaných zařízení. Jednou z prověřených metod pro obnovení původních mechanických vlastností konstrukčních materiálů je i regenerační žihání, které bylo v minulosti úspěšně aplikováno na vybrané tlakové nádoby reaktorů typu VVER 440. Pro materiály vnitřních částí reaktorů však analogický postup využit doposud nebyl. Materiály vnitřních částí reaktorů nejsou monitorovány programy svědečných těles, jako je tomu v případě tlakových nádob reaktorů, a stupeň jejich degradace se tak odhaduje převážně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře, nebo výpočetních postupů a norem. Předmětem příspěvku je ucelená prezentace vhodných parametrů regeneračního žihání pro aplikaci na ozářené materiály vnitřních částí reaktoru VVER 440 k obnovení výchozích mechanických vlastností.

Abstract

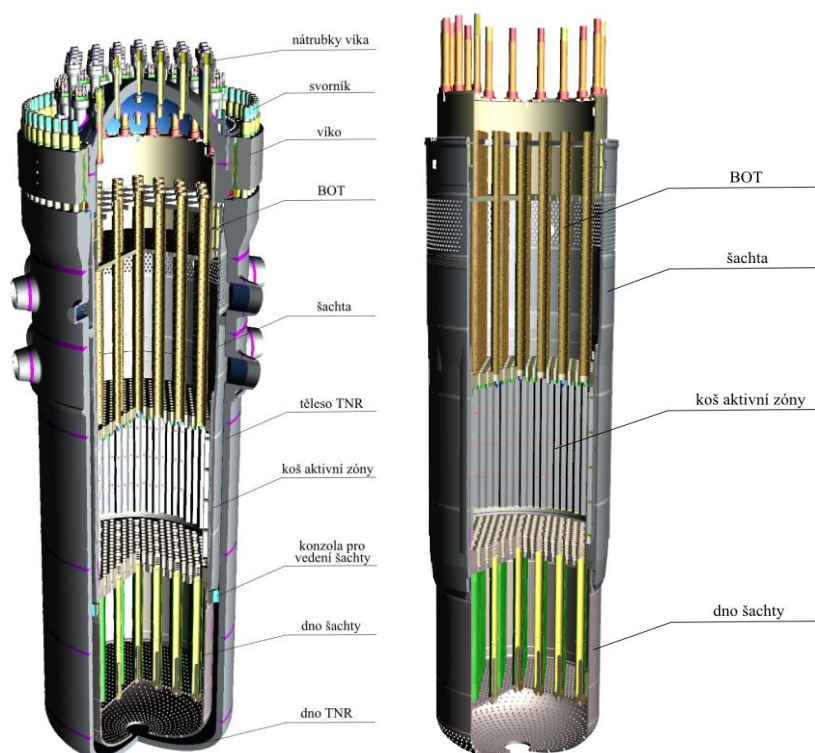
Within the current trend of industrial components life extension, in addition to innovative test methods for the mechanical properties determination, other methods are continuously developed and implemented. Their application to structural materials can have a significant benefits in the process of extending the life of equipment. One of the possible solutions for the initial mechanical properties of structural materials re-establishment is thermal annealing, which has been successfully applied on WWER 440 type reactor pressure vessels (RPV). The RPV internals are not monitored by surveillance programs and the degree of internals material degradation is usually based on literature data from tests on similar materials, from predictive formulae or other procedures and normative documents. The paper is focused on the comprehensive presentation of suitable recovery annealing parameters for application to irradiated materials of internal components of the WWER 440 type reactor for the re-establishment of initial mechanical properties.

Úvod

Hlavní funkce vnitřních částí reaktoru (VČR) sestávají z geometrického uspořádání palivových kazet v oblasti aktivní zóny (AZ), vymezení pohybu palivových kazet a regulačních tyčí a usměrnění toku chladiva kolem palivových kazet. VČR jsou z provozního hlediska důležitým prvkem tepelného a radiačního stínění tlakové nádoby reaktoru (TNR). Vnitřní části reaktoru jsou komponenty tzv. vnitřní vestavby uvnitř tlakové nádoby reaktoru. U reaktorů typu VVER

se jedná o komponenty (obr. 1): šachta (nosný válec), dno šachty, koš aktivní zóny (KAZ), blok ochranných trub (BOT) [1].

Regenerační žihání je metoda dosud aplikovaná pouze na tlakové nádoby reaktorů typu VVER 440 s cílem prodloužení jejich životnosti. Výsledky získané v rámci realizace projektu TH02020565 „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ (2017–2020) je možné považovat za základ pro přímou aplikaci na materiály vnitřních částí reaktorů typu VVER pro případné prodloužení životnosti. Na základě výsledků dosažených v rozsáhlém experimentálním programu řešeného projektu byl stanoven optimální režim pro regenerační žihání vnitřních částí reaktoru VVER 440 a zvolený postup byl následně certifikován [1]. Navržený program sestávající z mechanických zkoušek prováděných na ozářených i neozářených zkušebních tělesech před a po žihání umožnil stanovit vliv jednotlivých žihacích režimů na konstrukční materiály VČR v různém stupni ozáření.



Obr. 1: Konstruktivní uspořádání TNR a VČR reaktoru typu VVER 440 [2]

Experimentální materiál

Pro potřeby experimentálního programu byly k výrobě zkušebních těles využity části archivního materiálu, které byly odebrány z dříve provozovaných vnitřních částí reaktoru JE Greifswald. Jednotlivá zkušební tělesa byla vyrobena ze segmentu nosného válce, pláště koše AZ a hraněného plechu. Chemické složení experimentálního ozářeného materiálu i výsledná radiační dávka jsou uvedeny v tab. 1 a v tab. 2.

Experimenty a diskuse výsledků

Pro praktické ověření zvoleného postupu obnovy mechanických vlastností prostřednictvím regeneračního žihání byly využity zkoušky tvrdosti (dle ČSN EN ISO 6507-3 [3]) a zkoušky statické lomové houževnatosti (dle ASTM E1820 [4]). Za účelem stanovení citlivosti materiálů VČR ke vzniku a rozvoji trhlin EAC a IASCC v prostředí primárního okruhu byly provedeny zkoušky pomalou rychlostí deformace (SSRT). Jelikož se jedná o unikátní ozářený materiál 08Ch18N10T přímo z VČR jaderné elektrárny Greifswald, kterého je velmi omezené množství, bylo pro zkoušku statické lomové houževnatosti přistoupeno k výrobě miniaturizovaných zkušebních těles pro excentrický tah – typ mCT (10 x 10 x 4 mm). Na zkušebních tělesech tohoto

typu je možné provádět i měření tvrdosti HV 5 před a po regeneračním žihání, čehož bylo využito pro získání doplňkových dat popisujících odezvu ozářeného materiálu na aplikované regenerační žihání o různých parametrech.

Vliv žihání na tvrdost materiálu

Z výsledků měření provedených před a po žihání je patrný pozitivní vliv provedeného žihání. Tvrdost u ozářených těles je na počátku vyšší a po vyžihání dochází k jejímu snížení, a to až téměř na původní hodnoty typické pro neozářený materiál. Z obr. 2 je zřejmé, že žihání při teplotě 600 °C má na tvrdost obecně pozitivnější vliv než žihání při teplotě 550 °C. Stejně tak i doba výdrže 1 hodina na žihací teplotě nemá takový vliv jako žihání po dobu 4 a 6 hodin.

Vliv žihání na lomovou houževnatost

Výsledky ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na normalizované plastické deformaci jsou uvedeny na obr. 3 a obr. 4. V grafech jsou uvedeny výsledky zkušebních těles žihaných po identickou dobu a jejich porovnání s neozářeným a ozářeným stavem materiálu. Průměrné hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ jsou pro jednotlivé stavy materiálu pláště KAZ, nosného válce a hraněného plechu porovnány v tab. 3 a graficky znázorněny na obr. 5 a obr. 6. Podrobnou analýzou výsledků mechanických vlastností bylo potvrzeno, že regeneračním žiháním při teplotě 600 °C s výdrží 6 hodin dochází k nejpříznivější úrovni zotavení mechanických vlastností, odpovídající trendu zjištěnému na materiálech s nižším ozářením.

Závěr

Výsledky zkoušek mechanických vlastností prokázaly, že nejpříznivější obnovy mechanických vlastností bylo dosaženo u režimu žihání, při kterém je ozářený materiál žihán na vzduchu při teplotě 600 °C po dobu 6 hodin (s rychlostí ohřevu 10 °C za minutu). Tento režim žihání byl aplikován na zkušební tělesa vyrobená ze segmentů odebraných z komponent VČR, které jsou nejvíce vystavené ionizujícímu záření při provozu jaderného reaktoru. Konkrétně se jednalo o segmenty odebrané z nosného válce, pláště KAZ a hraněného plechu. Aplikace zvoleného optimálního režimu žihání na ozářeného materiálu reálných komponent VČR vyjmutých z vyřazeného reaktoru JE Greifswald vedla k obnově mechanických vlastností ozářením poškozeného materiálu, jak je uvedeno v tab. 4 a v tab. 5. Výsledky provedených mechanických zkoušek prokázaly pozitivní vliv provedeného regeneračního žihání jak při teplotě +24 °C, tak i při teplotě +310 °C, která odpovídá provozní teplotě vybraných komponent VČR.

Za účelem stanovení citlivosti vybraných experimentálních materiálů VČR ke vzniku a rozvoji trhliny EAC a IASCC v prostředí primárního okruhu reaktoru VVER – 440 za provozní teploty +310 °C, byly provedeny zkoušky pomalou rychlostí deformace na zkušebních tělesech typu SSRT. Při těchto zkouškách bylo prokázáno, že pro zvolený režim žihání nedochází ke zvýšení citlivosti ke koroznímu praskání v podmínkách chladiwa primárního okruhu. Výsledky těchto zkoušek a porovnání průběhu deformačních křivek prokázaly vhodnost tohoto režimu regeneračního žihání (obr. 7, obr. 8 a tab. 6). Výstupy realizovaného projektu poskytují základ pro případnou implementaci do průmyslové praxe a prodloužení provozní životnosti vnitřních částí reaktorů typu VVER 440 a tím i životnosti celého reaktoru v rámci dlouhodobé udržitelnosti energetiky.

Literatura

- [1] Schnablová, I. (2021): *TH02020565 – Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren*. Certifikovaná metodika, DITI 2303/232, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.
- [2] Sýkora, O. (2013): *Model Reaktoru VVER 440/213-Č*. Zpráva, DITI 2304/87, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.

[3] ČSN (2006): *EN ISO 6507-1, Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.

[4] ASTM (2020): *Standard ASTM E1820, Standard Test Method Measurement of Fracture Toughness*. Standard, ASTM E1820, ASTM International, West Conshohocken (PA).

Tab. 1: Výsledná radiační dávka pro zvolený ozářený materiál 08Ch18N10T

Ozářeno	2,4 dpa	5,2 dpa	11,4 dpa
Komponenta	Nosný válec 36 mm prstenec	Plášť koše aktivní zóny 32 mm prstenec	Hraněný plech 8 mm plát

Tab. 2: Výsledná radiační dávka pro zvolený ozářený materiál 08Ch18N10T

Materiál	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti
08Ch18N10T	≤ 0,08	1,0 – 2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥ 5C ≤ 0,6

Tab. 3: Průměrné hodnoty $J_{0,2}$ pro jednotlivé stavy a režimy regeneračního žíhání materiálu nosného válce, pláště KAZ a hraněného plechu

Stav materiálu	Komponenta / Materiál	Ozáření [dpa]	T=+24 °C		T=+310 °C	
			$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]
Neozářeno	-	-	283,7	0	202,8	0
Ozářeno	Nosný válec AGS I	2,4	179,6	-104,1	89,4	-113,4
Žíháno: 600 °C / 4 hod.			182,6	-101,1	165,5	-37,3
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			200,1	-89,6	187,1	-15,7
Ozářeno	Plášť KAZ AGS II	5,2	92,7	-191,0	61,4	-141,4
Žíháno: 600 °C / 4 hod.			289,1	+5,4	154,6	-48,2
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			291,7	+8,0	186,4	-16,4
Ozářeno	Hraněný plech AGS II	11,4	89,9	-193,8	32,5	-170,3
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			244,6	-39,1	155,3	-47,5

Tab. 4: Hodnocení míry obnovy $J_{0,2}$ zvoleného režimu regeneračního žíhání při teplotě zkoušky +24 °C

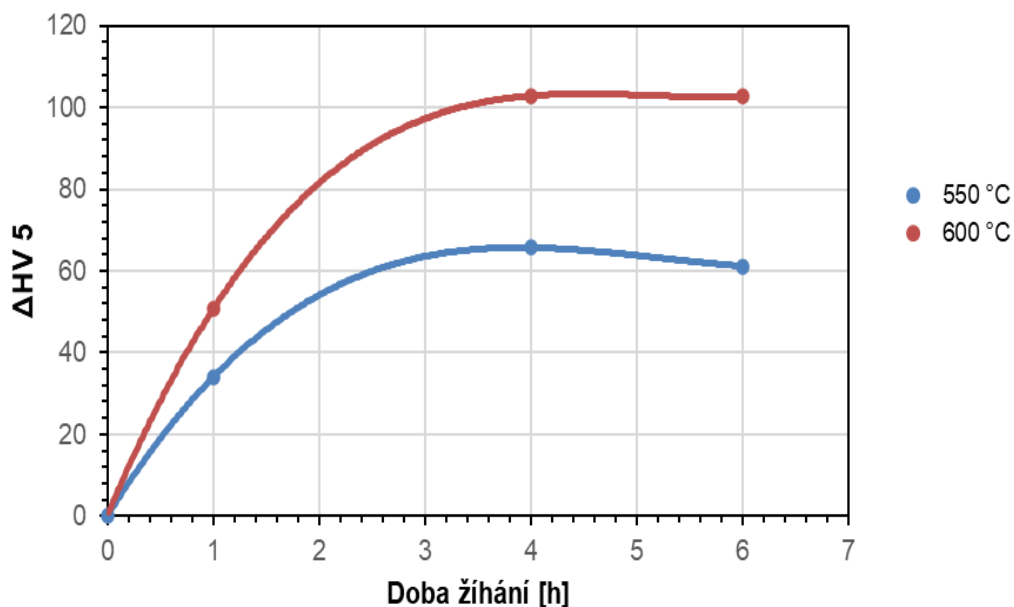
Komponenta VČR (teplota okolí +24 °C)	Podíl zotavení $J_{0,2}$	
		Nosný válec
Finální žíhací režim (600 °C/6 hod/vzduch)	Koš aktivní zóny	100 %
	Hraněný plech	86,2 %

Tab. 5: Hodnocení míry obnovy $J_{0,2}$ zvoleného režimu regeneračního žíhání při teplotě zkoušky +310 °C

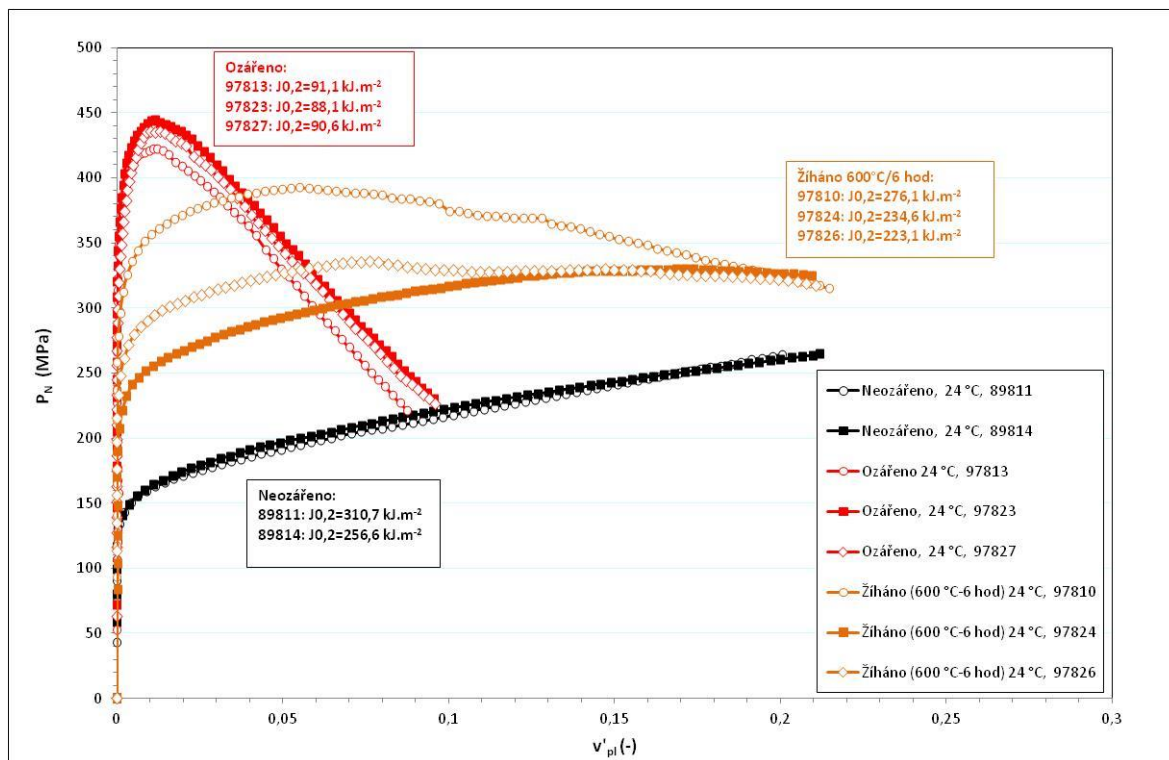
Komponenta VČR (teplota okolí +310 °C)		Podíl zotavení $J_{0,2}$
		Nosný válec
Finální žíhací režim (600 °C/6 hod/vzduch)	Koš aktivní zóny	91,9 %
	Hraněný plech	76,6 %

Tab. 6: Porovnání výsledků zkoušek SSRT pro vybrané stavy materiálů VČR v prostředí primárního okruhu VVER, +310 °C

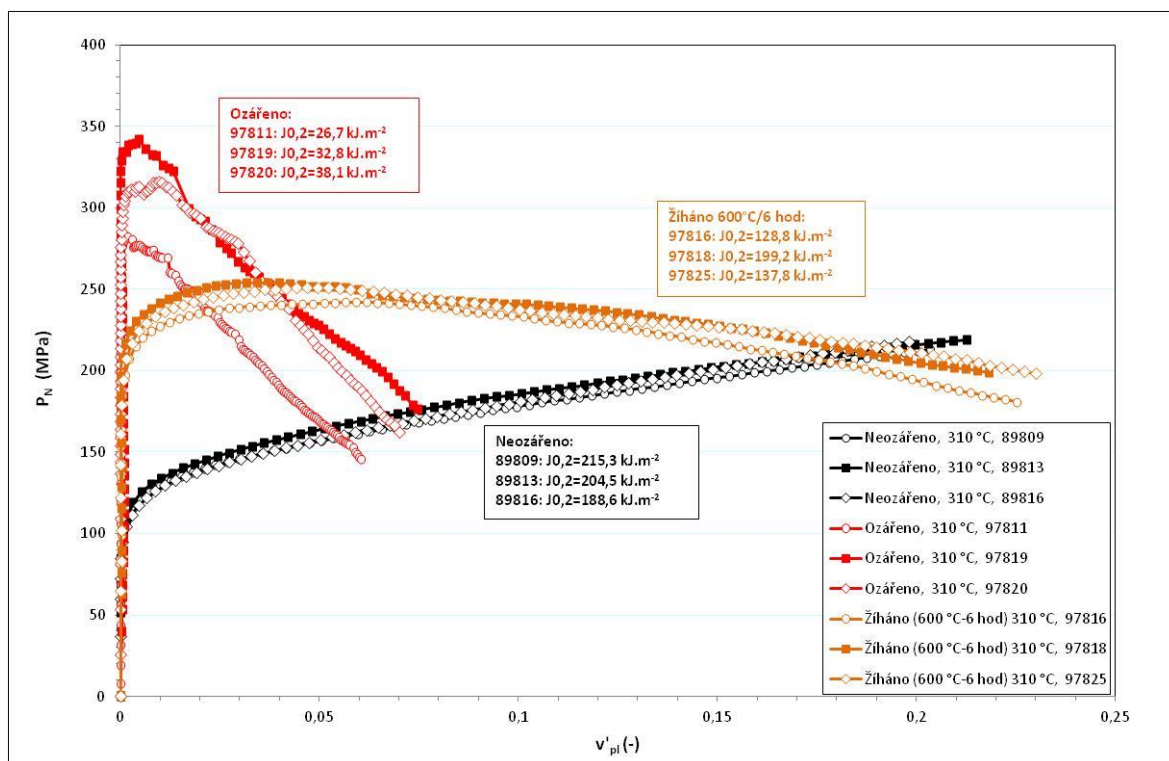
Materiál	Označení ZT	Stav	Rychlost deformace	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Plášť KAZ	8TA_157	neozářený	$7 \times 10^{-7} s^{-1}$	156	402	26	70
	8TA_159	5,2 dpa nežíhaný	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$	762	767	8.4	56
	8TA_160	5,2 dpa žíhaný 600 °C/4 hod	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$	443	378	min. 36	min. 50
	8TA_161	5,2 dpa žíhaný 600 °C/6 hod	$3 \times 10^{-7} s^{-1}$	421	326	min. 36	min. 50
Hraněný plech	8TA_158	Neozářený	$7 \times 10^{-7} s^{-1}$	90	462	32	39
	8TA_163	11,4 dpa nežíhaný	$2 \times 10^{-7} s^{-1}$	784	792	22	58
	8TA_164	11,4 dpa žíhaný 600 °C/ 6 hod	$3 \times 10^{-7} s^{-1}$	490	372	min. 36	min. 50



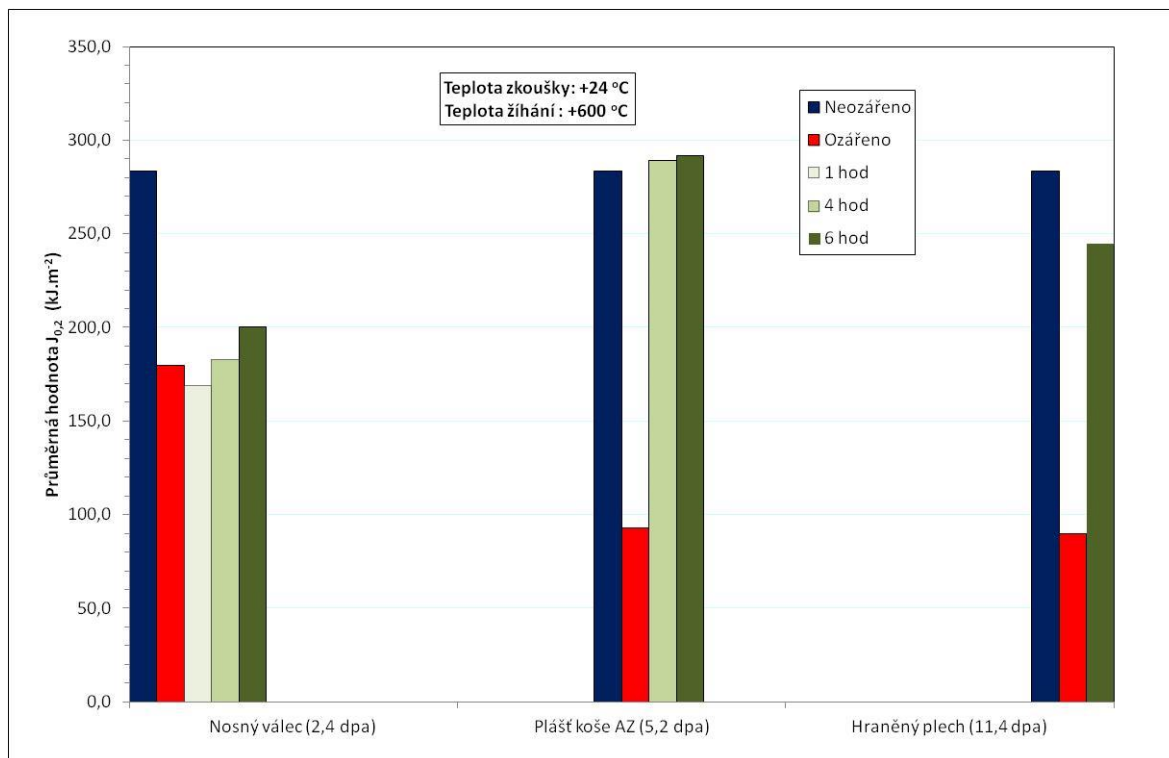
Obr. 2: Závislost změny tvrdosti před a po žíhání na zvoleném žíhacím režimu



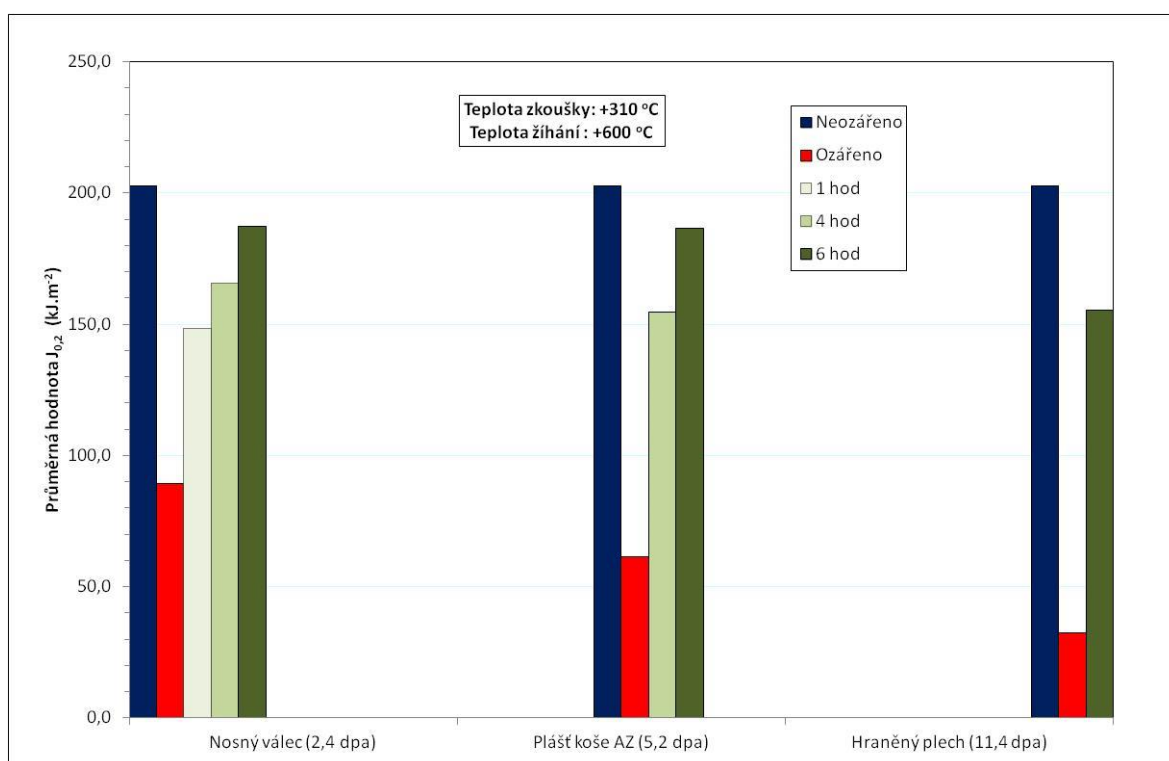
Obr. 3: Záznam ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na plastické deformaci při zkušební teplotě +24 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného stavu materiálu se zkušebními tělesy žihány po dobu 6 hodin (hraněný plech – 11,4 dpa).



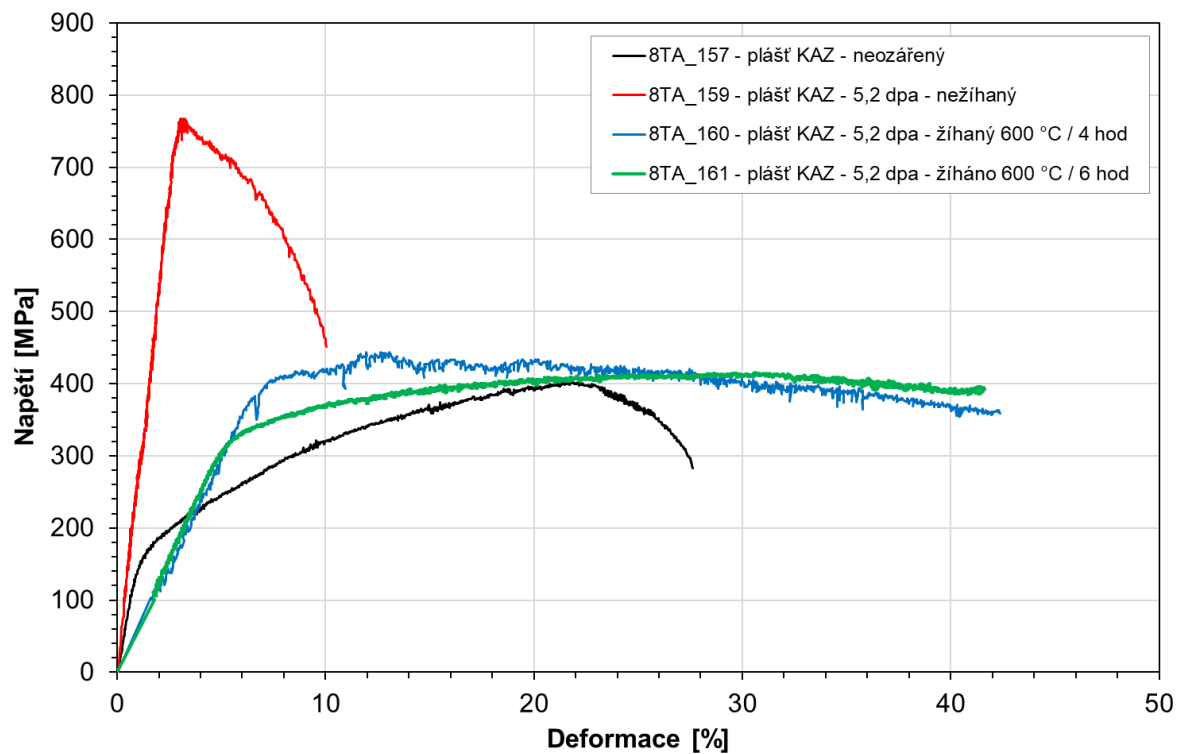
Obr. 4: Záznam ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na plastické deformaci při zkušební teplotě +310 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného stavu materiálu se zkušebními tělesy žihány po dobu 6 hodin (hraněný plech – 11,4 dpa).



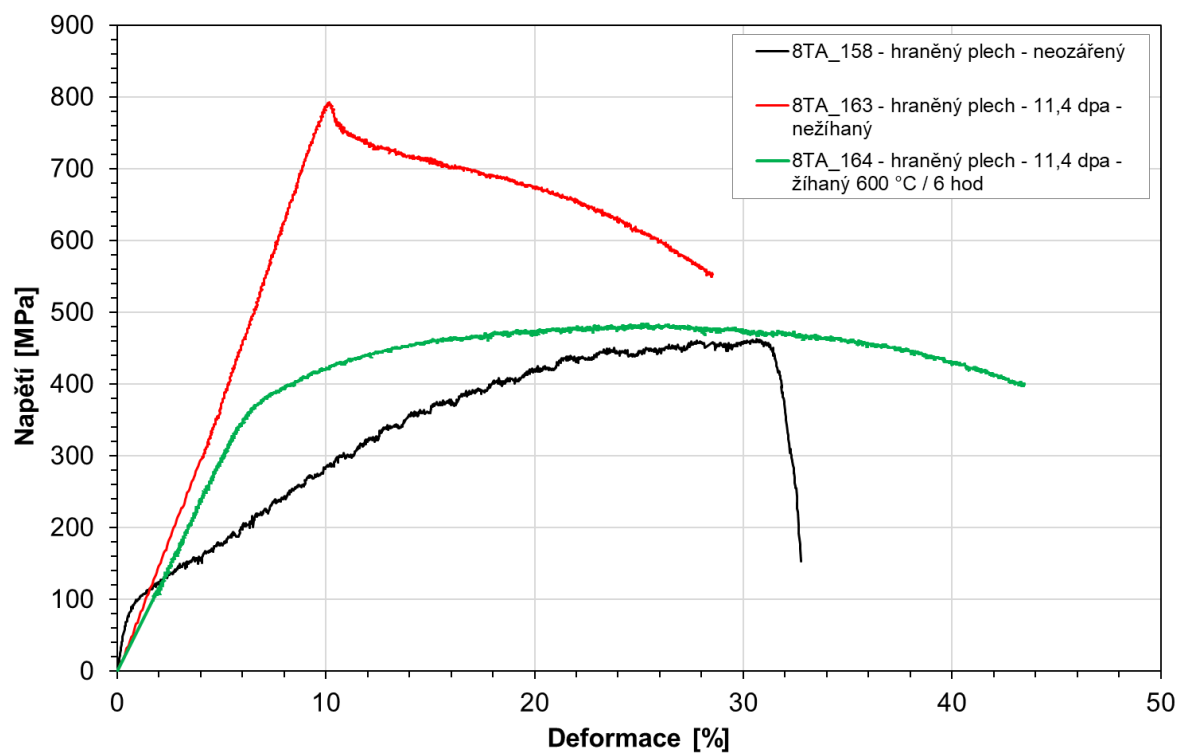
Obr. 5: Porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ při zkušební teplotě +24 °C a teplotě žihání 600 °C



Obr. 6: Porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ při zkušební teplotě +310 °C a teplotě žihání 600 °C



Obr. 7: Srovnání deformačních křivek materiálu pláště KAZ



Obr. 8: Srovnání deformačních křivek materiálu hraněného plechu