



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ing. Martin Bednařík

**Možnosti ovlivnění pevnosti lepeného spoje u vybraných
typů polymerů**

**Possibilities of Influencing the Strength of Bonded Joint at
Selected Types of Polymers**

Disertační práce

Program: P3909 Procesní inženýrství

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. David Maňas, Ph.D.

Zlín: 2015

Motto:

„Když všichni mluví o nemožnostech, hledej možnosti.“

Tomáš Baťa

Poděkování:

Touto cestou bych chtěl velice rád poděkovat mému školiteli panu doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za pomoc, ochotu, vynaložený čas a cenné rady, které mi pomohly při řešení disertační práce. Dále mé poděkování patří panu doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za jeho ochotu a cenné připomínky, a také firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. za technickou a finanční podporu v zastoupení panem Ing. Michalem Daňkem, Ph.D.

Můj největší dík však patří mým rodičům, bratrovi a přítelkyni za jejich bezmeznou podporu, a celé mé rodině, která mě po celou dobu mého studia podporovala.

Tato disertační práce vznikla za podpory vnitřní grantové agentury UTB ve Zlíně číslo IGA/FT/2015/006 financované z prostředků specifického výzkumu univerzity.

ABSTRAKT

Lepení patří ke stále více používaným a rozvíjejícím se metodám tvorby nerozebíratelných spojů. Pevnost lepeného spoje, která do značné míry determinuje možnosti aplikací této technologie je ovlivněna mnoha faktory. Vedle druhu použitého lepidla hrají významnou roli vlastnosti povrchové vrstvy, a proto je velká pozornost věnována jejich úpravám a modifikacím. Mezi důležité metody modifikace vlastností polymerů patří radiační síťování. V současné době nejvíce využívaným zářením k síťování polymerů je ionizační beta záření, které ovlivňuje mimo mechanických vlastností také povrchové vlastnosti a chemickou a teplotní odolnost.

Disertační práce se zabývá vlivem ionizačního beta záření na vlastnosti povrchové vrstvy u materiálů LDPE, HDPE a PP a také na výslednou pevnost lepených spojů.

V teoretické části jsou popsány základní teorie adheze a také možnosti modifikace povrchových vlastností za účelem zvýšení pevnosti lepeného spoje. Značná část je věnována problematice ozáření polymerů se zaměřením na ionizační beta záření. Z teorií adheze bylo mimo jiné zjištěno, že pro vytvoření kvalitního lepeného spoje by měla mít povrchová vrstva lepeného materiálu dobrou účinnost smáčení, což je charakterizováno nízkými hodnotami kontaktních úhlů smáčení, měli by se na ní vyskytovat reakceshopné funkční skupiny (karbonylové, hydroxylové aj.) a lepený materiál by měl mít vyšší povrchovou energii než smáčecí kapalina (lepidlo).

V experimentální části práce byly nejdříve popsány základní vlastnosti použitých materiálů a lepidel a následně byl zkoumán vliv ionizačního beta záření na povrchové vlastnosti a výslednou pevnost lepených spojů. Za účelem posouzení změn vlastností povrchové vrstvy v důsledku ozáření bylo využito měření kontaktních úhlů smáčení, volné povrchové energie a také bylo zkoumáno relativní zastoupení kyslíkatých funkčních skupin (karbonylových a hydroxylových), k jejichž posouzení byla použita infračervená spektrometrie.

Z výsledků měření kontaktních úhlů smáčení bylo zjištěno, že se zvyšující se dávkou záření dochází k jejich výraznému poklesu. Pokles kontaktních úhlů smáčení sebou přináší enormní zlepšení smáčecího účinku povrchové vrstvy. Pokles byl zaznamenán u všech použitých kapalin i zkoumaných materiálů. Nejnižších hodnot kontaktních úhlů a tím i nejlepší smáčivosti povrchové vrstvy bylo dosaženo u materiálů LDPE a HDPE dávkou 165 kGy. U materiálů PP to byla dávka 66 kGy.

U volné povrchové energie došlo se zvyšující se dávkou záření k extrémnímu navýšení. Tento nárůst sebou přináší markantní zlepšení adhezních vlastností, které měli zásadní vliv na konečnou pevnost lepených spojů. U materiálu LDPE a HDPE se jako nejvhodnější dávka, z hlediska volné povrchové energie, jeví 165 kGy, díky které její hodnoty vzrostly až téměř o 90 % vůči nemodifikovanému

materiálu. U materiálu PP to byla opět dávka 66 kGy u které byl zaznamenán nárůst o přibližně 60 %.

Výsledky z infračervené spektrometrie prokázaly, že modifikace ionizačním beta zářením zvyšuje zastoupení kyslíkatých funkčních skupin (karbonylových, hydroxylových) u všech zkoumaných materiálů.

Při měření pevností lepených spojů bylo zjištěno, že se zvyšující se dávkou záření jejich pevnost roste. U materiálů LDPE a HDPE byly zjištěny nejvyšší nárůsty v pevnosti při vyšších dávkách záření (99 až 198 kGy), kdežto u materiálů PP bylo maximálního navýšení dosaženo v některých případech již při nejnižší dávce záření (33 kGy).

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že ionizační beta záření výrazně zlepšuje smáčivost, zvyšuje volnou povrchovou energii a relativní zastoupení kyslíkatých skupin. V důsledku změn vlastností povrchové vrstvy dochází k enormnímu nárůstu výsledné pevnosti lepených spojů u materiálů LDPE, HDPE a PP.

Klíčová slova:

lepení, lepený spoj, adheze, ionizační beta záření, radiační síťování, kontaktní úhel smáčení, volná povrchová energie, oxidace, LDPE, HDPE, PP.

ABSTRACT

Bonding is and increasingly used, evolving method for the permanent joints formation. Strength of bonded joint determining the application of this method depends on many factors. Besides the type of adhesive used, properties of the surface layer have considerable influence and therefore a great importance is dedicated to their adjustments and modifications. Radiation crosslinking belongs among important methods for modification of polymers properties. Currently, the most used radiation for crosslinking polymers is ionizing beta radiation, which affects the mechanical properties but also surface properties and chemical and heat resistance.

This doctoral thesis examines the influence of ionizing beta radiation on the properties of surface layer of LDPE, HDPE, and PP and on the final strength of bonded joints.

The theoretical part describes the basic theory of adhesion and also possibilities of surface properties modification to increase the strength of bonded joints. A significant part is devoted to irradiation of polymers with a focus on ionizing beta radiation. From adhesion theories it follows that to create a good quality bonded joint the surface layer should have a good effectiveness of wetting. This is characterized by low values of the contact angle of wetting. Functional groups (carbonyl, hydroxyl, and others) should exist on the surface layer and bonded material should have a higher surface energy than the wetting liquid (adhesive).

In the experimental part of this thesis are described the basic properties of the used materials and adhesives, subsequently, the influence of ionizing beta radiation on the surface properties and on the final strength of bonded joints were studied. In order to assess changes in the properties of the surface layer due to irradiation, contact angle of wetting, surface free energy were measured, and also relative abundance of functional groups (carbonyl and hydroxyl) was examined. Infrared spectrometry was used for their assessment.

From the result of the contact angle measurements it was found that with an increasing radiation dose their values significantly decline. Decrease of the contact angle of wetting brings enormous improvement of the wetting effect of surface layer. Such a decrease was recorded for all the liquids and researched materials. The lowest values of contact angles and the best wettability of the surface layer of LDPE and HDPE were achieved with a dose of 165 kGy. For PP it was a dose of 66 kGy.

Values of surface free energy increased extremely with an increasing radiation dose. This increase brought an enormous improvement of adhesive properties that had fundamental influence on the final strength of bonded joints. For LDPE and HDPE the most suitable dose, in terms of surface free energy, seems to be

165 kGy due to which its value increased by almost 90 % compared to the unmodified material. For PP it was a dose of 66 kGy for which there was an increase of approximately 60 %.

The results of infrared spectroscopy showed that modification by ionizing beta radiation increased the representation of the functional groups (carbonyl, hydroxyl) for all the studied materials.

When measuring the strength of bonded joints it was found that with an increasing radiation dose increases their strength. For LDPE and HDPE the biggest increases in strength were detected at higher doses of radiation (from 99 to 198 kGy), while for PP the maximum increase already was reached at the lowest dose of radiation (33 kGy).

From the measured results it can be stated that ionizing beta radiation significantly improves wettability, increases the surface free energy and the relative abundance of functional groups. As a consequence of changes in the properties of the surface layer, an enormous increase in the final strength of bonded joints of LDPE, HDPE and PP occurs.

Keywords:

bonding, bonded joint, adhesion, ionizing beta radiation, radiation crosslinking, contact angle of wetting, surface free energy, oxidation, LDPE, HDPE, PP.

OBSAH PRÁCE

SEZNAM ILUSTRACÍ	10
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	16
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	19
1 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	21
1.1 POLYOLEFINY	22
1.1.1 Polyetylen (PE)	22
1.1.2 Polypropylen (PP)	24
2 LEPENÍ POLYMERŮ	26
2.1 ADHEZE A KOHEZE V LEPENÉM SPOJI	26
2.1.1 Mechanická teorie adheze	27
2.1.2 Chemická teorie adheze	27
2.1.3 Elektrostatická teorie adheze	28
2.1.4 Difúzní teorie adheze	28
2.1.5 Teorie smáčení	29
3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, POVRCHOVÁ ENERGIE A KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ	31
3.1 FÁZOVÁ ROZHRAŇÍ	31
3.2 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ	31
3.3 VOLNÁ POVRCHOVÁ ENERGIE	32
3.4 POVRCHOVÁ ENERGIE PEVNÝCH LÁTEK	34
3.5 KOHEZNÍ A ADHEZNÍ PRÁCE	34
3.6 KAPKA KAPALINY NA POVRCHU PEVNÉ LÁTKY (ÚHEL SMÁČENÍ)	35
3.6.1 Metoda přisedlé kapky (analýza profilu kapky)	37
3.7 ZÁKLADNÍ PŘÍSTUPY K VÝPOČTU POVRCHOVÝCH ENERGIÍ	38
3.7.1 Metoda Owens-Wendt-Raeble-Kaeble (OWRK)	38
4 METODY POVRCHOVÝCH ÚPRAV POLYMERŮ	40
4.1 OŠETŘENÍ KORÓNOVÝM VÝBOJEM	40
4.2 OŠETŘENÍ PLAMENEM	41
4.3 OŠETŘENÍ PLAZMOU	41
4.4 CHEMICKÉ LEPTÁNÍ	42
4.5 HODNOCENÍ ÚČINNOSTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV	43
4.5.1 Metoda na základě odhadu z povrchového napětí kapalin	43
4.5.2 Měření kontaktního úhlu smáčení	43
5 MODIFIKACE POLYMERŮ OZAŘOVÁNÍM	44

5.1	IONIZAČNÍ BETA (ELEKTRONOVÉ) ZÁŘENÍ.....	44
5.1.1	Měrné jednotky charakterizující ionizační záření	45
5.2	INTERAKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ S POLYMERY	45
5.3	ÚČINKY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ NA POLYMERNÍ MATERIÁLY	47
5.4	VÝHODY A NEVÝHODY OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ	49
6	CÍL PRÁCE.....	51
7	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	53
7.1	VOLBA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	53
7.2	VÝROBA A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	54
7.3	MODIFIKACE ZKUŠEBNÍCH TĚLES IONIZAČNÍM BETA ZÁŘENÍM.....	56
7.4	KONSTRUKCE LEPENÉHO SPOJE	56
7.5	PROVEDENÉ ZKOUŠKY	59
8	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	60
8.1	KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ	60
8.1.1	Materiál HDPE	61
8.1.2	Materiál LDPE.....	62
8.1.3	Materiál PP	64
8.2	VOLNÁ POVRCHOVÁ ENERGIE	65
8.2.1	Materiál HDPE	66
8.2.2	Materiál LDPE.....	68
8.2.3	Materiál PP	70
8.3	STANOVENÍ OBSAHU ZESÍŤOVANÉ FÁZE (GELU)	72
8.4	RELATIVNÍ ZASTOUPENÍ FUNKČNÍCH SKUPIN (HYDROXYLOVÝCH A KARBONYLOVÝCH)	74
8.4.1	Materiál HDPE	74
8.4.2	Materiál LDPE.....	76
8.4.3	Materiál PP	78
8.5	PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ.....	80
8.5.1	Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 1008.....	80
8.5.2	Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008.....	83
8.5.3	Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028.....	85
8.5.4	Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.....	88
8.5.5	Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátové lepidla Plexus MA300	90

8.5.6	Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832	93
8.5.7	Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806.....	96
8.5.8	Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705	98
8.6	POROVNÁNÍ ÚNOSNOSTI SPOJŮ U OZÁŘENÝCH MATERIÁLŮ A U MATERIÁLŮ MODIFIKOVANÝCH NÍZKOTLAKOU PLAZMOU	101
8.6.1	Materiál HDPE	101
8.6.2	Materiál LDPE.....	103
8.6.3	Materiál PP	104
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	106
9.1	VLIV IONIZAČNÍHO BETA ZÁŘENÍ NA VLASTNOSTI POVRCHOVÉ VRSTVY	106
9.2	VLIV IONIZAČNÍHO BETA ZÁŘENÍ NA VÝSLEDNOU PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ	110
9.2.1	Závislost povrchových vlastností a dávky záření na výslednou pevnost lepených spojů.....	112
9.2.2	Pevnost lepených spojů u ozářených materiálů a u materiálů modifikovaných nízkotlakou plazmou	114
10	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	116
11	ZÁVĚR.....	117
	LITERATURA	119
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	124
	CV AUTORA.....	133

SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 1.1: Základní rozdělení polymerů.....</i>	21
<i>Obr. 1.2: Struktura makromolekul různých typů PE</i>	23
<i>Obr. 2.1: Schéma struktury lepeného spoje.....</i>	26
<i>Obr. 2.2: Pevnost v odlupování polypropylenu a butylkaučuku v závislosti na teplotě lepení.....</i>	29
<i>Obr. 2.3: Příklady dobré a špatné smáčivosti</i>	30
<i>Obr. 3.1: Rozhraní kapalina/kapalina a rovnováha sil na molekulách kapalin.....</i>	32
<i>Obr. 3.2: “Ideální“ kapalinový box.....</i>	32
<i>Obr. 3.3: Kapka kapaliny na povrchu pevné látky</i>	36
<i>Obr. 3.4: Analýza profilu kapky pro výpočet kontaktního úhlu smáčení metodou přisedlé kapky</i>	37
<i>Obr. 4.1: Metody povrchových úprav polymerů.....</i>	40
<i>Obr. 4.2: Schéma úpravy korónovým výbojem za účelem zvýšení povrchové energie plastové fólie</i>	41
<i>Obr. 4.3: Schéma jednoduchého ošetření plazmou</i>	42
<i>Obr. 5.1: Primární procesy.....</i>	45
<i>Obr. 5.2: Ionizace a excitace</i>	46
<i>Obr. 5.3: Sekundární reakce.....</i>	47
<i>Obr. 5.4: Příklady chemických struktur polymerů s různými reakcemi na ozařování.....</i>	48
<i>Obr. 5.5: Vztah mezi molekulovou hmotností polymery (MW) a dávkou záření.....</i>	49
<i>Obr. 7.1: Zkušební tělesa určená pro konstrukci lepeného spoje.....</i>	55
<i>Obr. 7.2: Lepený spoj.....</i>	57
<i>Obr. 8.1: Kontaktní úhel smáčení materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	61
<i>Obr. 8.2: Kapka kapaliny na povrchu materiálu HDPE</i>	62
<i>Obr. 8.3: Kontaktní úhel smáčení materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	63
<i>Obr. 8.4: Kapka kapaliny na povrchu materiálu LDPE.....</i>	63
<i>Obr. 8.5: Kontaktní úhel smáčení materiálu PP v závislosti na dávce záření.....</i>	65
<i>Obr. 8.6: Kapka kapaliny na povrchu materiálu PP</i>	65
<i>Obr. 8.7: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu HDPE v závislosti na dávce záření</i>	67
<i>Obr. 8.8: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	67
<i>Obr. 8.9: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu LDPE v závislosti na dávce záření</i>	69
<i>Obr. 8.10: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	69

<i>Obr. 8.11: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu PP v závislosti na dávce záření</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 8.12: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu PP v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 8.13: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu HDPE (trendová křivka).</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 8.14: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu LDPE (trendová křivka).</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 8.15: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu PP (trendová křivka)..</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 8.16: Infračervená spektrometrie pro materiál HDPE a jednotlivé dávky záření.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 8.17: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka)..</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 8.18: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka)..</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 8.19: Infračervená spektrometrie pro materiál LDPE a jednotlivé dávky záření.</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 8.20: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka)....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 8.21: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka)....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 8.22: Infračervená spektrometrie pro materiál PP a jednotlivé dávky záření.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 8.23: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu PP v závislosti na dávce záření (trendová křivka).....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 8.24: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu PP v závislosti na dávce záření (trendová křivka).....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 8.25: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 8.26: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 8.27: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 8.28: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 8.29: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 8.30: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 8.31: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 8.32: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření</i>	<i>87</i>

<i>Obr. 8.33: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 8.34: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 8.35: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 8.36: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 8.37: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 8.38: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 8.39: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 8.40: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 8.41: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 8.42: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 8.43: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 8.44: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 8.45: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 8.46: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 8.47: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 8.48: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 8.49: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 8.50: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 8.51: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 9.1: Změna relativního zastoupení karbonylových skupin v závislosti na dávce záření (trendové křivky).....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 9.2: Změna relativního zastoupení hydroxylových skupin v závislosti na dávce záření (trendové křivky).....</i>	<i>109</i>

<i>Obr. 9.3: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a kontaktním úhlu smáčení</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 9.4: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a volné povrchové energii.....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 9.5: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a relativním zastoupení karbonylových skupin.....</i>	<i>113</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1.1: Základní vlastnosti nejvýznamnějších polyolefinů</i>	22
<i>Tab. 1.2: Třídění PE podle hustoty</i>	23
<i>Tab. 1.3: Srovnání některých vlastností základních druhů polyetylenů</i>	24
<i>Tab. 1.4: Základní vlastnosti polypropylenu</i>	24
<i>Tab. 2.1: Příklady energií Lifshitz-van der Waalsových interakcí a chemických vazeb.....</i>	28
<i>Tab. 4.1: Běžně používané roztoky pro ošetření polymerů.....</i>	42
<i>Tab. 5.1: Porovnání gama, beta a rentgenového záření</i>	44
<i>Tab. 5.2: Hodnoty ukazatele G pro síťování a štěpení u vybraných typů polymerů</i>	48
<i>Tab. 7.1: Vybrané vlastnosti materiálu LDPE (DOW LDPE 780 E).....</i>	53
<i>Tab. 7.2: Vybrané vlastnosti materiálu HDPE (DOW HDPE 255 55 E).....</i>	54
<i>Tab. 7.3: Vybrané vlastnosti materiálu PP (V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800).....</i>	54
<i>Tab. 7.4: Vstřikovací parametry použitých materiálů</i>	55
<i>Tab. 7.5: Seznam a označení použitých lepidel</i>	56
<i>Tab. 7.6.: Základní vlastnosti použitých kyanoakrylátových lepidel.....</i>	57
<i>Tab. 7.7: Základní vlastnosti použitých 2-komponentních metakrylátových lepidel.....</i>	58
<i>Tab. 7.8: Základní vlastnosti použitého epoxidového lepidla</i>	58
<i>Tab. 8.1: Hustota a povrchové napětí použitých kapalin</i>	60
<i>Tab. 8.2: Kontaktní úhly smáčení u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	61
<i>Tab. 8.3: Kontaktní úhly smáčení u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	62
<i>Tab. 8.4: Kontaktní úhly smáčení u materiálu PP v závislosti na dávce záření.....</i>	64
<i>Tab. 8.5: Volná povrchová energie u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	66
<i>Tab. 8.6: Volná povrchová energie u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.....</i>	68
<i>Tab. 8.7: Volná povrchová energie u materiálu PP v závislosti na dávce záření.....</i>	70
<i>Tab. 8.8: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 1008.....</i>	80
<i>Tab. 8.9: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008.....</i>	83
<i>Tab. 8.10: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028.....</i>	85
<i>Tab. 8.11: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.....</i>	88

<i>Tab. 8.12: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA300.....</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 8.13: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832.....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 8.14: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806.....</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 8.15: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705.....</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 8.16: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu HDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 8.17: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu LDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 8.18: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu PP, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.....</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 9.1: Změna kontaktních úhlů smáčení v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 9.2: Změna volné povrchové energie v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 9.3: Změna polární složky volné povrchové energie v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 9.4: Změna pevnosti lepených spojů v závislosti na dávce záření.....</i>	<i>111</i>
<i>Tab. 9.5: Maximální únosnost lepených spojů vzhledem k základnímu materiálu.....</i>	<i>114</i>

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ACO/ACH	Relativní zastoupení karbonylových skupin
AOH/ACH	Relativní zastoupení hydroxylových skupin
b	Šířka adhezního spoje [mm]
Bq	Becquerel
C	Uhlík
Cl	Chlor
cm	Centimetr
Co	Kobalt
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
E_{coh}	Energie potřebná k oddělení molekul [J]
eV	Elektronvolt
F	Síla potřebná k rozlepení adhezního spoje [N]
g	Gram
G(S)	Počet štěpení řetězců v polymeru na 100 eV absorbované energie
G(X)	Počet příčných vazeb a spojení zformovaných v polymeru na 100 eV absorbované energie
Gy	Gray
H	Vodík
HDPE	Polyetylen s vysokou hustotou
HMWPE	Polyetylen s vysokou molekulovou hmotností
in	Inch
J	Joule
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
l/g	Rozhraní kapalina/plyn
l/l	Rozhraní kapalina/kapalina
lb	Libra
LDPE	Polyetylen s nízkou hustotou
LLDPE	Lineární polyetylen s nízkou hustotou

m	Metr
MDPE	Polyetylen se střední hustotou
MeV	Megaelektronvolt
min	Minuta
mJ	Milijoule
MW	Molekulová hmotnost
N	Newton
Na	Sodík
O	Kyslík
OWRK	Metoda Owens-Wendt-Raebble-Kaebble
P	Polymer
PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
%	Procento
°C	Stupeň Celsiův
MPa	Megapascal
T _g	Teplota skelného přechodu [°C]
P _I	Komponenta charakterizující intenzitu mezifázových interakcí
P _M	Charakteristika mechanického ukotvení filmu adheziva v povrchu
PTFE	Polytetrafluoretylen
R	Radikál
rad	Radián
s	Sekunda
s/g	Rozhraní pevná látka/plyn
s/l	Rozhraní pevná látka/kapalina
s/s	Rozhraní pevná látka/pevná látka
SAN	Styren-akrylonitril
T	Teplota kapaliny [°C]
TAIC	Polyfunkční monomer – Triallylisokyanurát
T _c	Kritická teplota kapaliny [°C]
UHMWPE	Polyetylen s ultra vysokou molekulovou hmotností

ULDPE	Polyetylen s velmi nízkou hustotou
V	Molární objem [$\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$]
W	Watt
γ	Povrchová energie [$\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$]
γ^d	Disperzní složka povrchová energie [$\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$]
γ^p	Polární složka povrchová energie [$\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$]
δ	Parametr rozpustnosti [$\text{J}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-3/2}$]
θ	Kontaktní úhel smáčení [$^\circ$]
\bar{x}	Odhad aritmetického průměru
s_x^-	Střední chyba průměru

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Lepení zaznamenalo v posledních letech ohromný rozmach v oblasti spojování plastů, který způsobil, že je řazeno mezi nové technicky spojování, i když lepení samo je ve skutečnosti velmi staré.

Samotné počátky lepení sahají až do doby kamenné, kde pračlověk objevil lepivost některých látek. Přírodní živce ze stromů a rostlin, hlína a také některé vosky byly prvními adhezivy – pojivy, nicméně o lepidla v dnešním smyslu slova se ještě nejednalo. Podle různých pramenů se objevují důkazy o uvědoměném lepení staré okolo 6 tisíc let. Nicméně první zprávy o průmyslové výrobě lepidel přicházejí až ze 17. století našeho letopočtu a ve většině případů se jednalo o lepidla živočišného původu. První známý patent na výrobu rostlinného lepidla pochází až z roku 1791 a byl udělen v Anglii na použití lepidla z přírodního kaučuku a roku 1823 bylo taktéž v Anglii patentováno lepení kaučukovým lepidlem. Dalším mezníkem ve vývoji lepidel a lepení je objev nitrace celulózy, v letech 1845 a 1846, a následně vznik první továrny na celulózu, která byla otevřena v Americe roku 1872. V této fázi vývoje techniky lepení bylo těžiště pokroku především v obuvnictví a ve výrobě překližek. [1-5]

Téměř až do druhé světové války byly lepením spojovány jen ty materiály, které byly schopny lepidlo vsáknout (dřevo, kůže, textil a papír). Výjimkou byly fólie na bázi fenolické pryskyřice, která se využívala ke konstrukci větroňů a dřevěných motorových letounů a umožnila poznat přednosti lepených spojů, zejména co do úspor hmotnosti a vyšší únavové pevnosti. Z období před druhou světovou válkou mají pro lepení značný význam objevy některých polymerů (polychloroprenu, epoxidů, nenasycených polyesterů a butylkaučuku) a fenol formaldehydové pryskyřice. V důsledku zvýšení technické úrovně konstrukcí dochází po druhé světové válce ke značnému rozmachu výroby syntetických lepidel a souběžně s tím k vývoji technologií, umožňujících jejich racionální využití. [4, 6]

Na rozdíl od jiných odvětví vědy a techniky, ve kterých teorie předpověděla nové možnosti, v oblasti lepení teorie od začátku zaostávala za praxí. Až objev již zmíněných syntetických polymerů přispěl nejen k výrobě lepidel, ale také k rozvoji teorie, protože u syntetických lepidel byla známa jejich struktura, složení a vlastnosti a díky tomu bylo možné odvodit jejich chování a příčiny adheze.

Ve 30. letech 20. století McBain a Hamaker zkoumali různé aspekty vlivu vlastností povrchů na velikost adheze. McBain zavedl pojmy mechanické a specifické adheze a Hamaker, který se zabýval studiem mezimolekulárních sil na površích, dokázal, že disperzní (Londonovy) síly se uplatňují v závislosti na velikosti částic. Éra modernějších koncepcí lepení začala až v 50. letech téhož století, kdy vývoj pokročil pracemi De Bruyneho, Tabora, Bowdena a jiných. Koncentrovalo se úsilí poznat a využít pro adhezi vlastnosti povrchů a poznatky z oblasti fyzikální chemie (S. S. Vojtuskij, I. Langmuir, H. L. Frisch). Velký význam pro pokrok

mají také práce zabývající se povrchovou energií systémů (B. V. Derjagin, F. M. Fowkes). [3-9]

V následujících letech se teorie i technologie lepení velmi zdokonalila. S tím souvisí i vývoj měřících a zkušebních přístrojů a metod, od jednoduchých trhacích a odlupovacích zkoušek až po nedestruktivní metody stanovení statické i dynamické pevnosti spoje. [4, 6, 8]

Ve srovnání s klasickými metodami spojování (nýtováním, svařováním, šroubováním aj.) poskytuje lepení nové kombinační možnosti a dovoluje získat spoje takových tvarů a vlastností, které nejsou dosažitelné běžnými způsoby spojování. Nicméně, stejně tak jako i jiné metody spojování materiálů, vyznačuje se i lepení některými nevýhodami a limitujícími činiteli, na které se musí brát zřetel. Mezi hlavní nedostatek lepení patří především nutnost povrchové úpravy u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi. Příkladem takovýchto materiálů mohou být polyolefiny (především polyetylen a polypropylen), které jsou známy svým nepolárním charakterem a nízkou povrchovou energií, v důsledku čehož téměř nelze tyto materiály bez předchozí úpravy povrchu lepit.

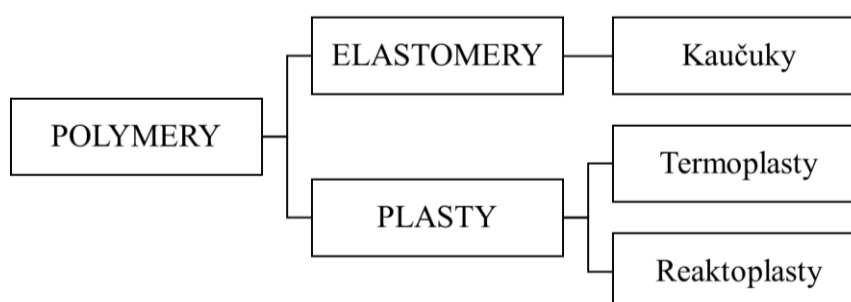
1 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Syntetické polymery se v dnešní době využívají téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Jejich historie započala těsně před první světovou válkou, kdy belgicko-americký chemik Beakeland připravil fenol formaldehydové pryskyřice. Velký rozmach výroby polymerů nastal za druhé světové války a po ní. Mezi hlavní příčiny neobyčejně rychlého a všestranného rozšíření výroby a zpracování polymerů především patří:

- 1) Možnost nahradit klasické materiály (kov, keramika, sklo, dřevo aj.), vůči kterým mají polymery zcela odlišné vlastnosti, v důsledku čehož mohou nabízet zcela nové aplikace a nová řešení materiálových problémů.
- 2) Výroba celé škály polymerů z relativně levných a dostupných surovin, a tím pádem také možnost nahradit nedostatkové a drahé materiály.
- 3) Relativně snadná zpracovatelnost tvářením z taveniny nebo roztoku, což umožňuje rychlou a levnou výrobu předmětů hromadné spotřeby. [1, 10, 11]

Nicméně, tak i jako u jiných materiálů existují i u polymerů vedle výhod také některé nedostatky. Mezi základní nevýhody, zejména u termoplastů, patří jejich omezená použitelnost v důsledku nízké teplotní odolnosti a u některých polymerů se přidávají také problémy se zpracováním odpadu. Polymery mají sklon k elektrostatickému nabíjení a navíc mají zpravidla nízkou tuhost. [1, 10]

Rozdělení polymerů podle základních technických vlastností je znázorněno na obrázku 1.1. První skupinou jsou elastomery, což jsou polymery, které rychle obnovují původní tvar a rozměry, které měly před deformací malým napětím (kaučuky). Druhou skupinou jsou plasty, které oproti elastomerům zůstávají deformovány, i když deformující napětí přestane působit (deformace je nevratná). Plasty se dále dělí na termoplasty, které působením tepla měknou a lze je opakovaně roztavit a chlazením převést zpět do tuhého stavu a na reaktoplasty, které zahříváním nevratně přecházejí do netavitelného a nerozpustného stavu. [10, 11]



Obr. 1.1: Základní rozdělení polymerů. [10]

Největší skupinou synteticky vyráběných polymerů jsou polyolefiny, a to především díky objemu výroby polyetylenu a polypropylenu, jejichž celosvětová spotřeba se neustále zvětšuje. [10]

1.1 Polyolefiny

Polyolefiny jsou homopolymery a kopolymery olefinů neboli alkenů, tj. uhlovodíků, které obsahují ve svých molekulách jednu dvojnou vazbu. K nejdůležitějším patří homopolymery a kopolymery etylenu a propylenu a homopolymer 1-butenu. Nejvýznamnější zástupci polyolefinů jsou znázorněny v tabulce 1.1. [11]

Tab. 1.1: Základní vlastnosti nejvýznamnějších polyolefinů. [10]

Polyolefin	Krystalinita (%)	Hustota (g/cm ³)	Teplota tání (°C)	Modul E (MPa)	Pevnost v tahu (MPa)
polyetylen lineární	65 – 95	0,954 – 0,970	125 – 136	700 – 1400	20 – 33
	rozvětvený	50 – 70	0,915 – 0,935	105 – 115	200 – 400
polypropylen izotaktický	60 – 70	0,905 – 0,912	160 – 176	1100 – 1500	34 – 38
	ataktický	0	0,85 – 0,87 (T _g = – 25 °C)	–	–
poly-1-buten izotaktický	40 – 50	9,15	125	200 – 500	10 – 15
	ataktický	0	0,880 (T _g = – 3 °C)	–	–
polyisobutylem ataktický	0	0,90 – 0,92	(T _g = – 73 °C)	–	2 – 6
poly-4-metyl-1-penten izotaktický	40	0,83	179	1500	27,5

1.1.1 Polyetylen (PE)

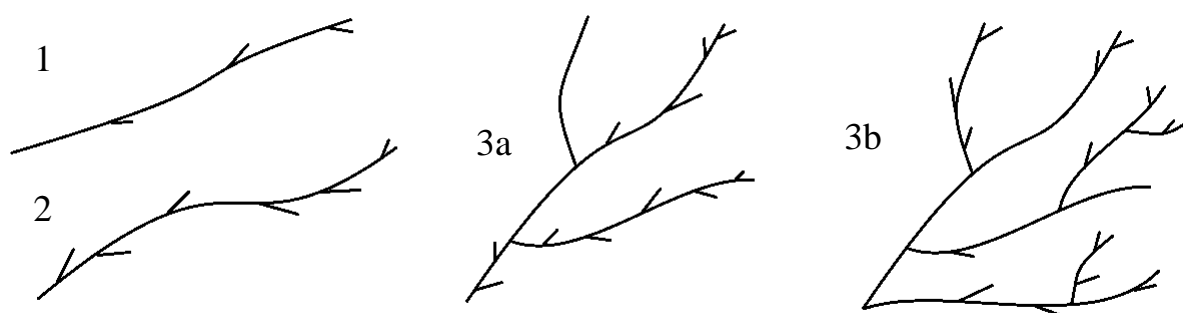
Jedním z nejznámějších zástupců skupiny polyolefinů je polyetylen (PE). Jako polyetylen jsou označovány homopolymery etylenu a jeho kopolymery. Polyetylen je vyráběn různými postupy a tvoří širokou škálu produktů s různými zpracovatelskými i užitnými vlastnostmi, které jsou silně závislé na molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání merů v řetězci makromolekuly a stupni krystalinity. [1, 10, 11]

Produkty s různým stupněm krystalinity se liší hustotou (hustota krystalické fáze PE je 1,00 g/cm³ a amorfni fáze je 0,855 g/cm³) a právě hustota polymeru, společně s charakterizací tvaru řetězce, se stala základem pro třídění polyetylenů. Jejich běžně používané označení je znázorněno v tabulce 1.2. Základními typy jsou LDPE, HDPE a LLDPE, někde jsou typy s hustotou pod 0,915 g/cm³ označovány jako ULDPE, produkty o hustotě 0,925 – 0,940 g/cm³ jako MDPE a typy s vysokou molekulovou hmotností jako HMWPE nebo UHMWPE. Rozdílnost ve tvaru polymerních řetězců tří základních typů je dána v důsledku různých polymeračních mechanismů a kopolymerace s α -olefiny. LDPE, vyráběný radikálovou polymerací, je často označován jako rozvětvený polyetylen nebo podle polymeračního tlaku jako vysokotlaký, zatímco polyinserci vyráběné HDPE a LLDPE jsou označovány jako lineární nebo také jako nízkotlaké nebo středotlaké. [10, 11]

Tab. 1.2: Třídění PE podle hustoty. [10, 11]

Typ	Zkratky	Hustota (g/cm ³)
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE (Ultra-Low Density)	0,888 – 0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE (Low Density)	0,910 – 0,955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE (Linear Low Density)	0,918 – 0,955
PE se střední hustotou	MDPE (Medium Density)	0,925 – 0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE (High Density)	0,941 – 0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE (High Molecular Weight HDPE)	0,944 – 0,954
PE s ultra vysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE (Ultra-High Molecular Weight HDPE)	0,955 – 0,957

Rozdíly v charakteru větvení polymerních řetězců tří základních typů polyetylenů jsou znázorněny na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Struktura makromolekul různých typů PE. [10]

1 – HDPE, 2 – LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé a krátké větvení, a – trubkový reaktor, b – autokláv)

Za běžných podmínek je polyetylen bílý a v tenčí vrstvě průhledný. Transparentnost se zvyšuje s rozvětveností makromolekul a jejich molekulovou hmotností. Chemická odolnost polyetylenů roste se stoupající krystalinitou. Při běžných teplotách odolává vodě, neoxidujícím chemikáliím včetně kyselin, zásad a polárním rozpouštědlům. Odolnost polyetylenů vůči nepolárním rozpouštědlům, zvláště za zvýšené teploty, je však značně omezena. Rozpouští se např. ve vroucím tetrachlormetanu, benzenu a toluenu. [10, 11]

Polyetylen má vynikající odolnost vůči nízkým teplotám, křehne až při -120 °C. Za zvýšených teplot si předměty z rozvětveného polyetylenů zachovávají tvarovou stálost přibližně do 90 °C a předměty z lineárního polyetylenů do více než 100 °C. Srovnání některých vlastností základních druhů polyetylenů je znázorněno v tabulce 1.3. [11]

Tab. 1.3: Srovnání některých vlastností základních druhů polyetylenů. [10]

Vlastnost	LDPE	LLDPE	HDPE
Hustota (g/cm ³)	0,915 – 0,935	0,910 – 0,925	0,941 – 0,967
Teplota tání (°C)	106 – 112	125	130 – 133
Pevnost v tahu (MPa)	7 – 17	14 – 21	18 – 30
Prodloužení při přetržení (%)	100 – 700	200 – 1200	100 – 1000
Modul pružnosti (MPa)	415 – 795	248 – 365	689 – 1654
Tvrdość, Shore D	45 – 60	41 – 53	60 – 70

Polyetylen nachází využití jak u technických výrobků (fólie, trubky, pláště kabelů), tak i u spotřebního zboží (výrobky pro domácnost, hračky aj.). Polyetylen typu UHMW slouží např. k výrobě kluzných vodičích elementů, filtrů, ložisek, šneků vytlačovacích strojů aj. [11]

1.1.2 Polypropylen (PP)

Radikálovou nebo kationovou polymerací propylenu se získávají jen nízkomolekulární produkty, sestávající z rozvětvených, ataktických molekul. Až v roce 1954 bylo zjištěno, že v přítomnosti katalyzátorů Zieglerova typu vzniká z monomeru vysokomolekulární, vysoce krystalický izotaktický polypropylen. [10, 11]

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75 %, který má podobně jako polyetylen prakticky nepolární strukturu a teplota tání čistého izotaktického polypropylenu je 176 °C. Kromě vyšší teploty měknutí a tím i použitelnosti při vyšších teplotách se polypropylen liší od lineárního polyetyleny nižší hustotou a menší odolností vůči mrazu, ale na druhou stranu vyšší pevností, tvrdostí a odolností vůči oděru. Je také méně propustný pro plyny a páry. Odolnost polypropylenu vůči chemikáliím je ve srovnání s polyetylenem taktéž větší, zvláště při zvýšených teplotách. Podobně se však rozpouští při teplotách nad 80 °C v aromatických a chlorovaných uhlovodících. Základní vlastnosti polypropylenu jsou uvedeny v tabulce 1.4. [10, 11]

Tab. 1.4: Základní vlastnosti polypropylenu. [11]

Hustota (kg/m ³)	900 – 910
Pevnost v tahu (MPa)	22 – 32
Tažnost (%)	120 – 700
Houževnatost (kJ/m ²)	10 – 15
Navlhavost (%)	0,1

Polypropylen se zpracovává (podobně jako polyetylen) vstřikováním a vyfukováním na menší a duté předměty, vytlačováním na trubky, desky, profily a výtlačným vyfukováním na fólie. Bloky a desky je také možné lisovat z granulí. Vzhledem k lepším mechanickým vlastnostem, v porovnání s polyetylenem, se polypropylen využívá na součásti strojů a přístrojů, např. v automobilovém a spotřebním průmyslu (vstřikované dílce přístrojových desek a ventilátorů, nárazníky aj.). Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje jeho použití na dílce injekčních stříkaček a jiné zdravotnické techniky. Polypropylen se také široce využívá k výrobě mechanicky i chemicky odolných vláken. [11]

2 LEPENÍ POLYMERŮ

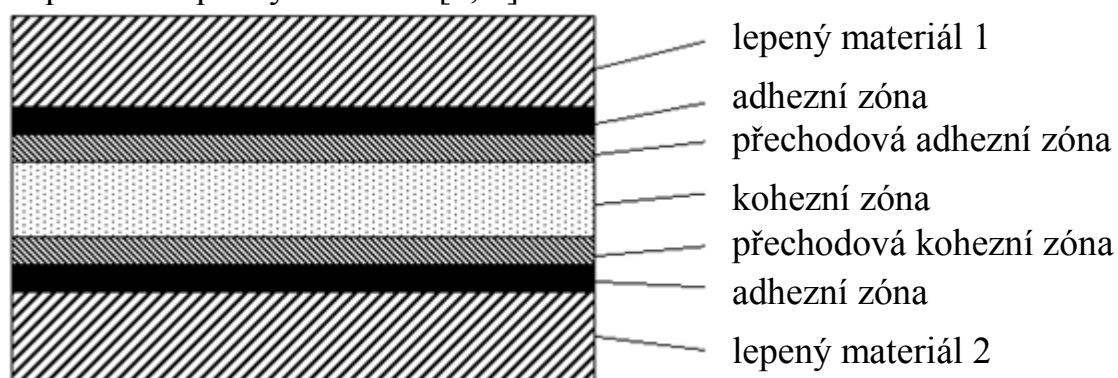
Lepením rozumíme metodu, pomocí které lze dosáhnout trvalého spoje stejných nebo rozdílných materiálů pomocí lepidla. Lepidlo je látka, která spojuje povrchy přilnavostí (adhezi) a vlastní soudružností (kohezi), aniž se podstatně mění struktura slepované hmoty. [2, 3]

2.1 Adheze a koheze v lepeném spoji

Každý kvalitní a konstrukčně pevný lepený spoj lze považovat za soubor několika navzájem vázaných vrstev (Obr. 2.1), kde míra adheze každé jednotlivé vrstvy k vrstvám sousedním i koheze vrstev samých může značně ovlivnit celkovou kvalitu spoje. [5-8]

Mezi základní podmínky pro vytvoření kvalitního lepeného spoje především patří:

- správný návrh konstrukce spoje,
- správná volba materiálů (lepidlo, lepený materiál),
- vhodná povrchová úprava lepených materiálů,
- zachování předepsaného postupu použití zvoleného lepidla,
- vytvoření dokonalých mechanických a fyzikálně-chemických podmínek pro vznik pevných vazeb. [8, 9]



Obr. 2.1: Schéma struktury lepeného spoje. [5]

Koheze charakterizuje stav látky (lepidla, lepeného materiálu), ve kterém drží její částice působením mezimolekulárních a valenčních sil pohromadě. Velikost koheze udává tzv. kohezní energie, což je velikost energie, které je potřebná k odtržení jedné částičky od ostatních.

Adheze (přilnavost) je vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Adheze souvisí s molekulovou strukturou lepidla. V současné době neexistuje univerzální teorie, která by vysvětlila a popsala kompletní jevy adheze. [6, 7]

Mezi nejčastěji přijímané teorie především patří:

- mechanická teorie,
- chemická teorie,
- elektrostatická teorie,

- difúzní teorie,
- teorie smáčení.

2.1.1 Mechanická teorie adheze

Podle mechanické teorie nastane adheze proniknutím lepidla do pórů, dutin a jiných povrchových nepravidelností na povrchu lepeného materiálu. Po proniknutí lepidla do povrchových nerovností dochází k vytlačení vzduchových bublin zachycených na rozhraní a zaklínění lepidla k povrchu lepeného materiálu. Původním autorem této teorie je McBain, teorii později rozpracovali především Bruyne a Houwink. Pozdější autoři začali uvažovat mimo mechanického zaklínění adhezního filmu v povrchu materiálu i vliv mezifázových interakcí. Pevnost adhezního spoje, vyjádřená poměrem síly, potřebné k jeho rozlepení a šířky adhezního spoje (F/b) je pak dle nich výslednicí působících faktorů [12-14]:

$$\frac{F}{b} = K \cdot P_M \cdot P_I, \quad (2.1)$$

kde P_M je charakteristika mechanického ukotvení filmu adheziva v povrchu materiálu a P_I je komponenta charakterizující intenzitu mezifázových interakcí adhezního filmu a materiálu. Mechanické teorie adheze jsou dnes využívány jen ve specifických případech, jako je např. adheze pryžových směsí k textilním vláknům nebo výroba překližek. [7, 12-14]

2.1.2 Chemická teorie adheze

Tento mechanismus připisuje vytvoření adhezní vazby povrchovým chemickým silám. Vodíkové, kovalentní a iontové vazby mezi lepidlem a lepeným materiálem jsou silnější než disperzní přitažlivé síly (Tab. 2.1). Obecně platí, že existují čtyři typy interakcí, které se konají v průběhu chemického spojování:

- kovalentní vazby,
- vodíkové můstky,
- Lifshitz-van der Waalsovy síly,
- acidobazické interakce.

Přesná povaha interakce pro konkrétní lepený spoj je dána chemickým složením rozhraní. Kovalentní a iontové vazby jsou příklady chemických vazeb, které poskytují mnohem vyšší hodnoty adheze, než poskytují sekundární síly. Interakce, které vážou lepidlo a lepený materiál mohou být taktéž podpořeny mechanickými, difúzními nebo elektrostatickými mechanismy. [12-16]

Kovalentní chemické vazby se pravděpodobně vyskytují u zesíťovaných lepidel a termosetových povlaků. Tyto vazby jsou obvykle nejsilnější a nejodolnější, ale vyžadují existenci vzájemně reaktivních chemických skupin. Některé povrchy, jakou jsou např. předem povrstvené povrchy, dřevo, kompozity a některé plasty obsahující různé funkční povrchy, mohou za vhodných podmínek

produkovat chemické vazby se spojovacím materiálem. Pomocí vhodných povrchových úprav plastů lze tyto podmínky záměrně vytvořit. [12, 13, 16]

Tab. 2.1: Příklady energií Lifshitz-van der Waalsových interakcí a chemických vazeb. [12]

Typ	Příklad	E (kJ/mol)
Kovalentní	C – C	350
Iontová – Iontová	Na ⁺ ...Cl ⁻	450
Iontová – Dipólová	Na ⁺ ...CF ₃ H	33
Dipólová – Dipólová	CF ₃ H... CF ₃ H	2
Londonova Disperzní	CF ₄ ...CF ₄	2
Vodíková vazba	H ₂ O...H ₂ O	24

2.1.3 Elektrostatická teorie adheze

Tato teorie předpokládá, že adheze vzniká v důsledku elektrostatických jevů mezi lepidlem a lepeným materiálem. Elektrické síly v podobě elektrické dvojvrstvy jsou vytvořeny na rozhraní lepidlo-lepený materiál. Tato teorie si získala podporu z toho hlediska, že byl elektrický výboj pozorován při odlupování lepidla z podkladu. Nicméně, při podrobnějších studiích nebyla prokázána korelace mezi velikostí povrchového elektrického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení. [7, 12, 13, 14]

2.1.4 Difúzní teorie adheze

Tato teorie naznačuje, že adheze je rozvíjena prostřednictvím vzájemné difúze molekul mezi lepidlem a lepeným materiálem. Teorie difúze je použitelná především v případech, kdy lepidlo i lepený materiál jsou polymery s relativně dlouhými řetězci molekul, které jsou schopny pohybu. [3, 7, 12, 13]

Pro interpretaci difúzního lepení může být použita hodnota kohezní energie (CED, Rov. 2.2), která je charakterizována následujícími vztahy [12, 13]:

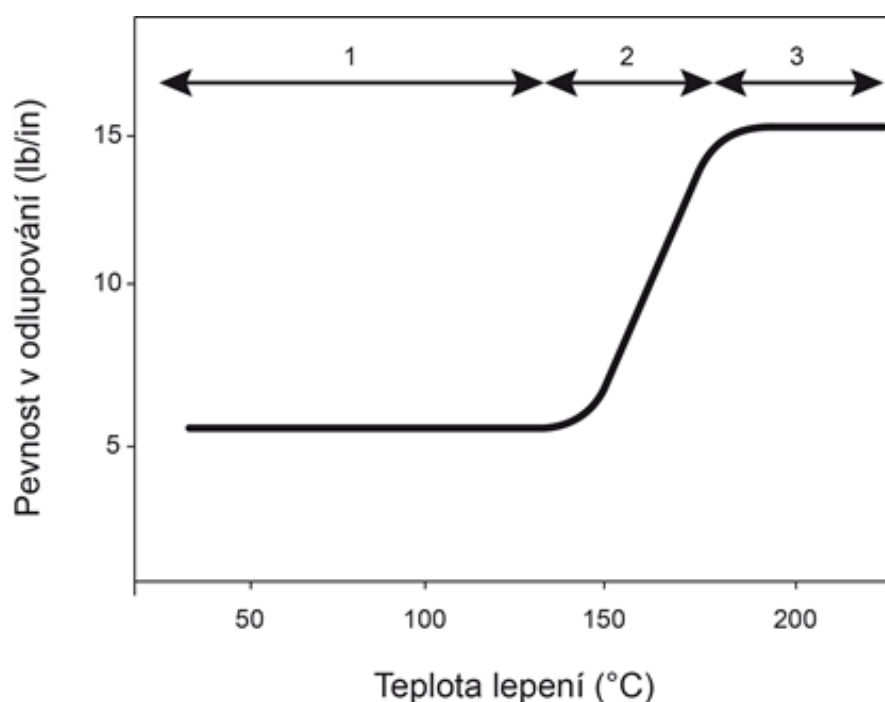
$$\text{CED} = \frac{E_{\text{coh}}}{V}, \quad (2.2)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{E_{\text{coh}}}{V}}, \quad (2.3)$$

kde E_{coh} je množství energie, která je potřeba k oddělení molekul, V označuje molární objem a δ je parametr rozpustnosti. [12, 13]

Vhodným příkladem je adheze polyetylenu a polypropylenu k butylkaučuku. Lepený spoj vykazuje nízkou pevnost, když jsou dva polymery lepeny při teplotách pod bodem tání polyolefinu. Pevnost spoje prudce roste ve chvíli, kdy proces adheze probíhá nad teplotou tání polyetylenu (135 °C) a polypropylenu (175 °C).

Následující obrázek (Obr. 2.2) popisuje pevnost spoje (pevnost v odlupování) jako funkci teploty lepení. Závěr může být, že při zvýšených teplotách, interdifúze polyolefinů a butylkaučuku se zvyšuje, což vede ke zvýšení pevnosti spoje. [7, 12, 13, 17]



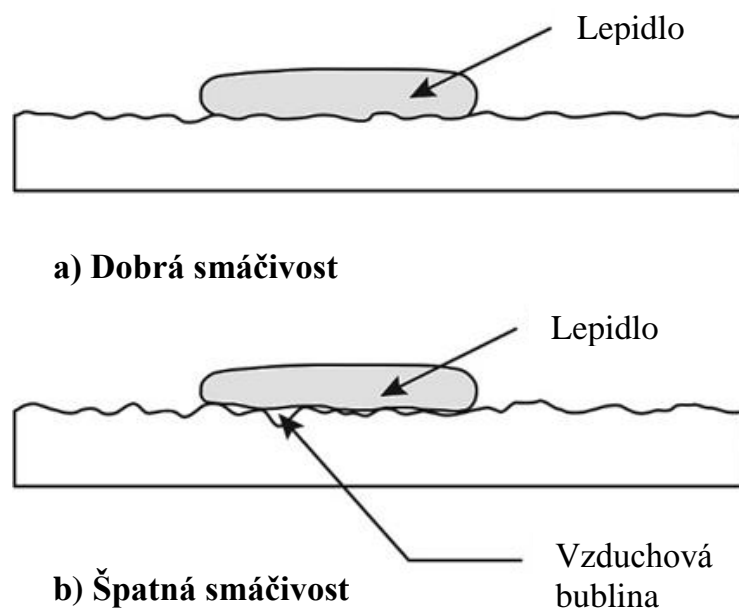
Obr. 2.2: Pevnost v odlupování polypropylenu a butylkaučuku v závislosti na teplotě lepení. [17]

(1 – adhezní porucha, 2 – adhezní/kohezní porucha, 3 – kohezní porucha)

2.1.5 Teorie smáčení

Tato teorie naznačuje, že adheze je výsledkem molekulárního kontaktu dvou materiálů a povrchových sil, které se vyvíjejí mezi nimi. Prvním krokem při tvorbě vazby je vyvinutí mezifázových sil mezi lepidlem a lepeným materiálem. Proces, kterým se stanoví trvalý kontakt mezi lepidlem a lepeným materiálem se nazývá smáčení. [2, 3, 12, 13]

Pro vznik kvalitního lepeného spoje by mělo mít lepidlo nižší povrchové napětí než je kritické povrchové napětí pevné (lepené) látky, což je důvod, kvůli kterému se povrchy některých plastů musím před lepením ošetřit. [12, 13]



Obr. 2.3: Příklady dobré a špatné smáčivosti. [5, 12]

Obrázek 2.3 znázorňuje úplné a neúplné smáčení povrchu lepeného materiálu lepidlem. Úplné smáčení nastane, když lepidlo zateče i do prohlubní a štěrbin, které se vyskytují na povrchu. Naopak k nedostatečnému smáčení dochází, když lepidlo nevyplní povrchové prohlubně a štěrbin, v důsledku čehož dojde ke snížení skutečné kontaktní plochy mezi lepidlem a povrchem lepeného materiálu, a tím i ke snížení celkové pevnosti spoje. Neúplné smáčení vytváří mezifázové poruchy, které jsou příčinou poklesu kvality spoje. Pokud je dosaženo úplného smáčení, je zajištěna také vysoká pevnost spoje. [7, 12, 13]

Jak již bylo zmíněno, kritéria pro dobré smáčení vyžadují, aby lepidla měla nižší povrchové napětí než lepený materiál. To částečně vysvětluje, proč organická lepidla, jako jsou epoxidy, mají vynikající přilnavost ke kovu, ale na druhou stranu poskytují jen velmi slabou přilnavost k neošetřeným polymerním materiálům, jako jsou např. polyetylen a polypropylen. Povrchová energie polymerních materiálů musí být zvýšena vhodnými metodami ošetření povrchu, díky kterým dojde ke zlepšení smáčení (viz. kapitoly 4 a 5). [3, 5, 12, 13]

3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, POVRCHOVÁ ENERGIE A KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ

Věda, zabývající se povrchovými vlastnostmi je důležitým odvětvím fyzikální organické chemie, která studuje chování a vlastnosti molekul na povrchu, v jeho těsné blízkosti nebo na rozhraní, které může být tvořeno mezi pevnými látkami, kapalinami, plyny anebo kombinací těchto stavů.

Polymerní materiály a jejich povrchy se v současné době těší stále většího zájmu ze strany průmyslu, především pro průmyslové a biologické aplikace (zubní implantáty, protetické pomůcky aj.). Modifikace povrchů těchto produktů umožňuje vznik kontrolovaných rozhraní pro dosažení požadovaných vlastností, jako je např. lepitelnost a kompatibilita. [12-18]

3.1 Fázová rozhraní

Pod pojmem fáze se rozumí určitá část objemu zkoumaného systému, ve které jsou vlastnosti konstantní nebo se spojitě mění v prostoru. Jak již bylo uvedeno, jednotlivé fáze jsou odděleny fázovým rozhraním. Z makroskopického hlediska fázovým rozhraním rozumíme oblast, ve které se jedna nebo více vlastností systému mění skokem. Z mikroskopického, molekulárního hlediska mají fázová rozhraní určitou tloušťku (minimálně jeden, ale většinou několik molekulárních průměrů) a tedy i určitý objem. [12, 18, 19]

Vlastnosti fázového rozhraní jsou ovlivňovány vlastnostmi obou stýkajících se fází a podle skupenského stavu stýkajících se objemových fází rozhraní dělíme:

- rozhraní kapalina/plyn (l/g),
- rozhraní kapalina/kapalina (l/l),
- rozhraní pevná látka/plyn (s/g),
- rozhraní pevná látka/kapalina (s/l),
- rozhraní pevná látka/pevná látka (s/s).

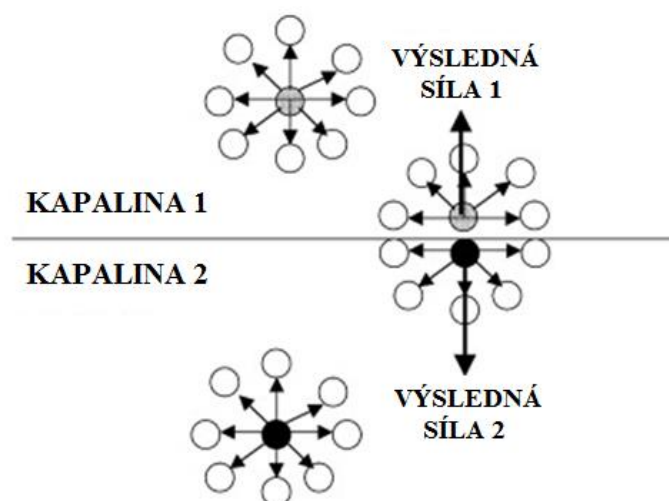
Různé typy rozhraní mají některé společné vlastnosti, nicméně v řadě vlastností se však podstatně liší. Hlavní rozdíly spočívají v charakteru povrchu kapaliny a povrchu pevné látky. [19]

Makroskopické vlastnosti a chování látek (např. výparné teplo) i jevy na fázových rozhraních (mezifázové napětí, smáčení a rozestírání, adheze a koheze aj.) jsou do větší či menší míry ovlivňovány silami, které mají původ v meziatomárních nebo mezimolekulárních interakcích. [18, 19]

3.2 Povrchové napětí

Molekuly kapaliny jsou drženy pohromadě pomocí přitažlivých sil. Hodnota součtu všech přitažlivých sil na libovolné molekule, přítomné v objemu kapaliny je v průměru nulová. To ovšem neplatí u výslednice sil v blízkosti rozhraní, jejichž hodnota je nenulová a směřuje dovnitř prostředí s vyšší kohezní energií (Obr. 3.1).

Síla, která působí proti zvětšení plochy povrchu je označována jako *kohezní síla* a energie spotřebovaná tímto procesem se nazývá *povrchová energie*. [12, 18, 19]



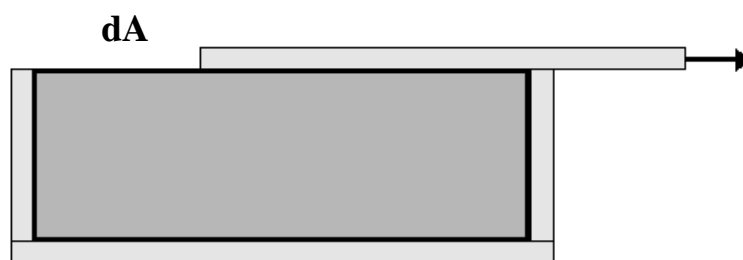
Obr. 3.1: Rozhraní kapalina/kapalina a rovnováha sil na molekulách kapalin. [12, 18]

Povrchové napětí je definováno jako práce, která je nutná k jednotkovému zvětšení plochy izotermicky a reverzibilně. Lze ji vyjádřit jako povrchovou energii na jednotku plochy a popřípadě také jako sílu na jednotku délky. Povrchové napětí kapalin lze měřit přímo a lze ho vyjádřit v jednotkách práce nebo energie na jednotku plochy. [12, 18, 19]

Povrchové napětí polymerů (γ) lze rozdělit na dvě složky: polární (γ^p) a disperzní (γ^d), jejichž zastoupení je závislé na chemickém složení povrchu. Polární složka vychází z polárních molekulárních interakcí, včetně vodíkové vazby a dipólové a indukční energie, zatímco disperzní složka vychází z Londoňových disperzních interakcí. Tyto přitažlivé síly (van der Waalsovy a Londoňovy disperzní) jsou sčitatelné, z čehož vyplývá, že i jednotlivé komponenty povrchového napětí lze sečíst ($\gamma = \gamma^p + \gamma^d$). [12, 18]

3.3 Volná povrchová energie

Pro popis pojmu volné povrchové energie může být použit následující hypotetický příklad. Krabice s posuvným víkem je naplněna kapalinou (Obr. 3.2). [12]



Obr. 3.2: "Ideální" kapalinový box. [18]

Předpokladem je, že mezi víkem a kapalinou se nevyskytuje mezifázové napětí. Pokud se víko odsune, odhalí se část plochy povrchu (dA). Pro čisté látky je zvýšení volné povrchové energie systému při konstantní teplotě a tlaku definováno podle následujícího vztahu (Rov. 3.1). [12, 18]

$$dG = \gamma dA \quad (3.1)$$

Celková volná energie systému se skládá z energie objemu kapaliny a energie povrchu kapaliny, která je dále určena jako volná povrchová energie na jednotku plochy (G_S) násobená plochou povrchu (Rov. 3.2).

$$dG = G_S dA \quad (3.2)$$

Z výše uvedených rovnic je zřejmé, že volná povrchové energie čisté látky je rovna jejímu povrchovému napětí (Rov. 3.3). [12, 18]

$$G_S = \left(\frac{dG}{dA} \right)_{T, P} = \gamma \quad (3.3)$$

V reverzibilním systému, teplo (q) spojené s eliminací nového povrchu může souviset s entropií (S) nebo povrchovou entropií (Rov. 3.4), kde S_S představuje povrchovou entropii na jednotku plochy. [18]

$$dq = T dS = T S_S dA \quad (3.4)$$

Následující rovnice (Rov. 3.5) reprezentuje termodynamický vztah, aplikovaný na povrch kapaliny, ve kterém T představuje absolutní teplotu. Následně je dosažením za G_S (z rovnice 3.3) získána rovnice 3.6. [12, 18]

$$\left(\frac{dG_S}{dT} \right)_P = -S_S \quad (3.5)$$

$$\frac{d\gamma}{dT} = -S_S \quad (3.6)$$

Celková povrchová energie (Rov. 3.7) může být určena použitím entalpického vztahu s Gibbsovou volnou energií a entropií na povrchu kapaliny. [18]

$$H_S = E_S = G_S + T S_S \quad (3.7)$$

$$E_S = G_S - T \frac{d\gamma}{dT} \quad (3.8)$$

Povrchové napětí většiny kapalin s rostoucí teplotou lineárně klesá. Rovnice 3.9 definuje vztah mezi teplotou a povrchovým napětím:

$$\gamma V^{2/3} = k(T_C - T), \quad (3.9)$$

kde V je molární objem, T_C je kritická teplota kapaliny a T je teplota kapaliny. Předpokládá se, že povrchové napětí kapaliny se bude při kritické teplotě blížit nule. [12, 18, 19]

3.4 Povrchová energie pevných látek

Pevná látka je definovaná jako materiál, který je tuhý a odolný vůči namáhání. Povrchy pevných látek mohou být rozděleny podle hodnoty povrchové energie na: povrchy s vysokou povrchovou energií a povrchy s nízkou povrchovou energií. Mezi materiály s vysokou povrchovou energií patří především kovy a anorganické sloučeniny, jako jsou oxidy, diamanty, nitridy aj. Povrchové napětí vysokoenergetických materiálů se pohybuje v rozmezí 200 – 500 dyn/cm. Mezi nízkenergetické materiály řadíme především polymery. Povrchy polymerních materiálů lze dále dělit na:

- *povrchy s nízkou povrchovou energií* (kritické povrchové napětí se pohybuje v rozmezí 10 – 30 dyn/cm),
- *povrchy se střední povrchovou energií* (kritické povrchové napětí se pohybuje v rozmezí 30 – 40 dyn/cm),
- *povrchy s vysokou povrchovou energií* (kritické povrchové napětí je větší než 40 dyn/cm). [12, 18, 19]

3.5 Kohezní a adhezní práce

Při rozestírání kapaliny po povrchu pevné látky nebo po povrchu jiné kapaliny si konkurují přitažlivé síly mezi molekulami rozestírané kapaliny (kohezní síly) a mezimolekulární síly mezi oběma fázemi, jejichž rozhraní při rozestírání zvětšuje svou plochu (adhezní síly). [12, 18, 19]

Kohezní síly v rozestírané kapalině A jsou charakterizovány tzv. kohezní prací, která je definovaná jako práce potřebná k roztržení sloupce kapaliny o jednotkovém průřezu, tj. pro vytvoření dvou nových rovnovážných rozhraní s plynou fází (Rov. 3.10). [18, 19]

$$W_K = 2\gamma_A \quad (3.10)$$

Podobně je definovaná také adhezní práce, což je práce potřebná k odtržení sloupce kapaliny A o jednotkovém průřezu od druhé fáze B (Rov. 3.11):

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}, \quad (3.11)$$

kde γ_A je povrchová energie rozestírané kapaliny, γ_B je povrchová energie fáze B a γ_{AB} mezifázová energie.

Podmínkou, aby se kapalina A rozestírala po fázi B v souvislou vrstvu je, aby rozdíl mezi adhezní a kohezní prací, nazývaný Harkinsův rozestírací koeficient, byl kladný (Rov. 3.12). [12, 18, 19]

$$S_{A/B} = W_A - W_K = \gamma_B - \gamma_{AB} - \gamma_A > 0 \quad (3.12)$$

Z definice rozestíracího koeficientu je patrné, že u systémů voda – organická látka bude docházet k rozestírání organických kapalin na vodném povrchu hlavně v případě, že se jedná o látky, v jejichž molekulách jsou polární skupiny, a tudíž jejich adheze vůči vodě bude velká (mezifázová energie γ_{AB} je v tomto případě velice malá). Také nepolární látky, např. uhlovodíky, se mohou rozestírat na vodě, i když jejich adheze vůči vodě je malá, protože rovněž jejich kohezní energie je velice malá. Naproti tomu voda, která má velikou kohezní energii (povrchové napětí vody je mnohem větší než povrchové napětí většiny organických látek), se na povrchu organických kapalin nerozestírá. [12, 18, 19]

3.6 Kapka kapaliny na povrchu pevné látky (úhel smáčení)

Při styku kapaliny s povrchem nerozpustné pevné látky se uplatňují tři mezifázové energie:

- povrchová energie pevné látky (γ_{sg}),
- mezifázová energie pevná látka/kapalina (γ_{sl}),
- povrchová energie kapaliny (γ_{lg}), jejichž relativní hodnoty ovlivňují výsledné uspořádání systému. [19]

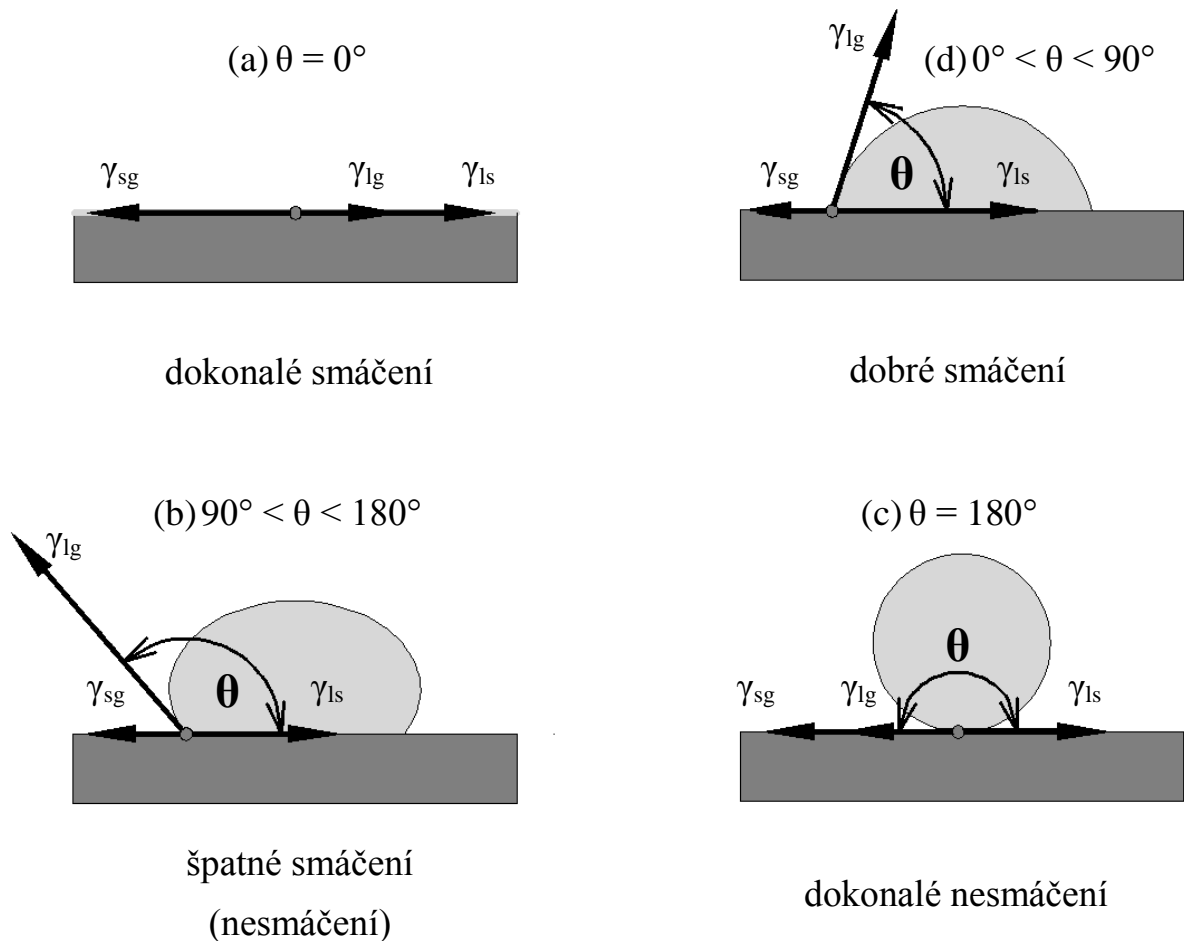
Je-li umístěna kapka kapaliny na povrch pevné látky, tak mohou nastat následující dva případy:

1. Je-li povrchová energie pevné látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie pevná látka/kapalina ($\gamma_{sg} > \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$), tak dojde k rozetření kapaliny po povrchu pevné látky do souvislé vrstvy. Fázové rozhraní pevná látka/plyn je nahrazeno dvěma rozhraními, pevná látka/kapalina a kapalina/plyn (každé z nich o stejné ploše jako původní rozhraní) a výsledná energie systému je nižší.
2. Jestliže naopak platí $\gamma_{sg} < \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$, k rozestírání nedojde a kapka kapaliny zaujme na povrchu pevné látky rovnovážný tvar, charakterizovaný kontaktním úhlem smáčení (θ). Kontaktní úhel smáčení je úhel, který svírá tečna k povrchu kapky kapaliny s rozhraním pevná látka/kapalina v bodě linie smáčení (Obr. 3.3). Podmínka rovnováhy, která je vyjádřena jako vektorový součet mezifázových napětí, vede k tzv. Youngově rovnici (Rov. 3.13). [12, 18, 19]

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos\theta \quad \Rightarrow \quad \cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (3.13)$$

Kapalina, pevná látka a plyn se stýkají v křivce, označované jako linie smáčení. Podle velikosti úhlu smáčení mohou nastat následující příklady (Obr. 3.3):

- dokonalé smáčení ($\theta = 0^\circ$),
- dobré smáčení ($0^\circ < \theta < 90^\circ$),
- špatné smáčení – nesmáčení ($90^\circ < \theta < 180^\circ$),
- dokonalé nesmáčení ($\theta = 180^\circ$). [19]



Obr. 3.3: Kapka kapaliny na povrchu pevné látky. [19]

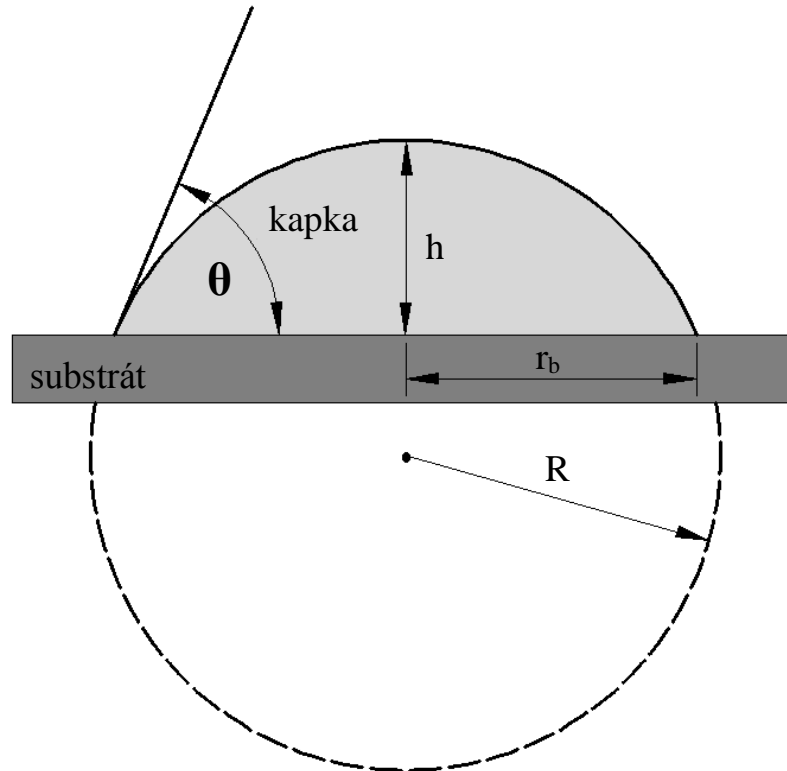
Povrchy smáčené kapalinami jsou označovány jako lyofilní, je-li kapalinou voda, jako hydrofilní. Povrchy špatně smáčené kapalinami jsou označovány jako lyofobní, je-li kapalinou voda, jako hydrofobní. [12, 18, 19]

Kontaktní úhel smáčení je jednou z mála přímo měřitelných vlastností rozhraní pevná látka/kapalina/plyn. Pro jeho měření jsou v současné době nejvíce využívané následující metody:

- Měření úhlu mezi nakloněnou deskou z měřeného materiálu a vodorovným povrchem kapaliny – destička je ponořena do kapaliny a naklání se tak dlouho, až je povrch kapaliny rovný k čáře styku mezi deskou a kapalinou.
- Metoda vyvažování destičky – je měřena síla, která je potřebná k vyvážení destičky, nebo výška, do níž vzlíná kapalina na vertikální destičce vnořené do kapaliny.
- Přímé měření úhlu smáčení na kapce kapaliny umístěné na rovinném povrchu pevné látky, osvětlené svazkem paprsků rovnoběžných s povrchem. Kontaktní úhel smáčení (θ) je měřen buď přímo mikroskopem, opatřeným geometrickou stupnicí, pomocí fotografie kapky, nebo lze snímat profil kapky kamerou a úhel smáčení vyhodnotit pomocí softwaru (Kap. 3.6.1, Obr. 3.4). [18, 19]

3.6.1 Metoda přisedlé kapky (analýza profilu kapky)

Jak již bylo uvedeno, kontaktní úhel smáčení lze vypočítat metodou přisedlé kapky, která spočívá v analýze profilu kapky. Aby bylo možné vypočítat kontaktní úhel pomocí této metody, musí být kapka dostatečně malá, aby bylo možno zanedbat odchylku od kulovitého tvaru. [20]



Obr. 3.4: Analýza profilu kapky pro výpočet kontaktního úhlu smáčení metodou přisedlé kapky. [20]

(h – výška kapky, r_b – poloměr kapky v místě styku, R – poloměr celé kapky)

Výšku kapky (h) a její poloměr v místě styku (r_b) lze určit z následujících vztahů (Rov. 3.14 a 3.15).

$$h = R(1 - \cos\theta) \quad (3.14)$$

$$r_b = R \sin\theta \quad (3.15)$$

Poté lze napsat:

$$\frac{h}{r_b} = \frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.16)$$

Po změření výšky (h) a poloměru (r_b) lze kontaktní úhel vypočítat z rovnice 3.16. U velkých kapek může nastat problém, kdy hodnoty h a r_b mohou být zkresleny gravitací a tudíž tuto rovnice nelze pro výpočet použít (bylo by nutné použít daleko komplikovanějších výpočtů). [20, 21]

Kontaktní úhel lze také vypočítat z objemu kapky, kdy změříme poloměr kapky v místě styku (r_b) a kontaktní úhel následně vypočítáme za vztahu získaného pomocí trigonometrie (Rov. 3.17).

$$\frac{r_b^3}{V} = \frac{3\sin^3\theta}{\pi(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \quad (3.17)$$

V případech, kdy je možno změřit hodnoty r_b a h , je výhodnější použít následující vztah (Rov. 3.18).

$$\frac{r_b^2 h}{V} = \frac{3(1 + \cos\theta)}{\pi(2 + \cos\theta)} \quad (3.18)$$

Z předchozích vztahů (Rov. 3.16 – 3.18) vyplývá, že základem kapky je přesný kruh, což je hlavním zdrojem možných nepřesností této metody, protože kapka má jen zřídka (vzhledem k různorodosti povrchu pevných látek) kulovitý tvar. [20, 21]

3.7 Základní přístupy k výpočtu povrchových energií

V současné době existuje několik přístupů, které se využívají k určení volné povrchové energie pevných látek. Její stanovení z kontaktních úhlů smáčení je závislé na vztahu, který byl navržen v roce 1805, a je známý jako Youngova rovnice (Kap. 3.6, Rov. 3.13). Mezi nejběžnější metody patří [12, 21-23]:

- Zismanova metoda,
- Fowkesova metoda,
- Owens -Wendt-Raeble -Kaeble (OWRK) metoda,
- Wu teorie,
- Acido-bazická teorie.

3.7.1 Metoda Owens-Wendt-Raeble-Kaeble (OWRK)

Metoda OWRK je v současné době jednou z nejvíce využívaných metod pro určení volné povrchové energie, zejména u polymerních povrchů. Tato metoda vychází z Fowkesovy metody, ale na rozdíl od ní počítá povrchovou energii v jednom kroku. K určení volné povrchové energie stačí dvě kapaliny se známými polárními a disperzními složkami (tzn. polární a nepolární kapalina). Dle této metody je povrchové napětí dáno součtem disperzních γ^d a polárních složek γ^p . Pro kapalinu (γ_l) a pevnou látku (γ_s) tedy platí následující vztahy (Rov. 3.19 a 3.20). [12, 21-23]

$$\gamma_l = \gamma_l^d + \gamma_l^p \quad (3.19)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (3.20)$$

V kombinaci s Youngovou rovnicí (Rov. 3.13) je dosaženo následujících vztahů (Rov. 3.21 a 3.22).

$$\gamma_1(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_1^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_1^p} \quad (3.21)$$

$$(\gamma_1^d + \gamma_1^p)(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_1^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_1^p} \quad (3.22)$$

Jak již bylo zmíněno, tak dvě neznámé γ_s^d a γ_s^p mohou být určeny pomocí měření kontaktního úhlu na daném povrchu za použití nejméně dvou různých kapalin, u nichž známe γ_1^d a γ_1^p . [12, 21-23]

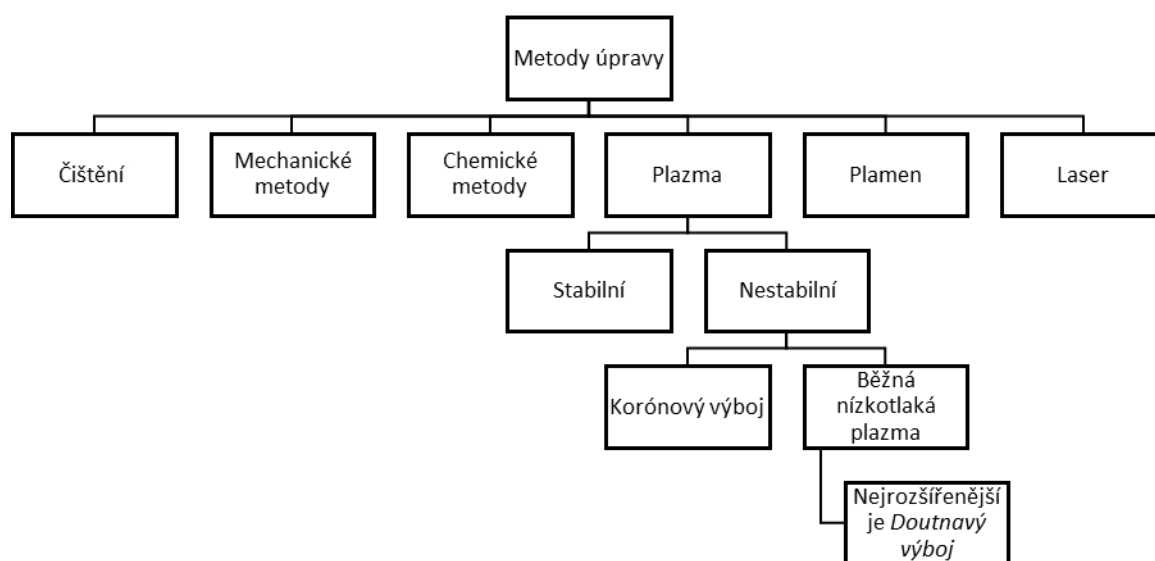
Pokud je rovnice dále upravena tak, aby bylo dosaženo rovnice přímky (Rov. 3.23), lze následně určit výslednou hodnotu pomocí lineární regrese za použití většího množství kapalin. Tímto lze eliminovat případnou chybu způsobenou výběrem nevhodné kombinace testovacích kapalin. [20, 21]

$$\frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{\gamma_1}{\sqrt{\gamma_1^d}} = \sqrt{\gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_s^p} \sqrt{\frac{\gamma_1^p}{\gamma_1^d}} \quad (3.23)$$

4 METODY POVRCHOVÝCH ÚPRAV POLYMERŮ

Důležitým a významným rozdílem mezi kovy a plasty je jejich povrchová energie. Polymery mají podstatně nižší povrchovou energii než kovy, a tím pádem mají tendenci tvořit velmi nekvalitní adhezní vazby (pokud nejsou vhodným způsobem ošetřeny). [12, 13, 17, 18]

Tato kapitola popisuje nejvýznamnější metody pro ošetření povrchů polymerů za účelem zvýšení adheze (Obr. 4.1). Ne všechny metody mají stejné komerční využití, jelikož jsou omezeny jejich rozsahem použití. Například plazmová úprava je omezena na menší díly a součástky a ošetření plamenem a korónovým výbojem jsou účinné pro ošetření kontinuálních filmů (pasů) a tenkých vrstev z plastu. [12, 13, 15, 17, 18]



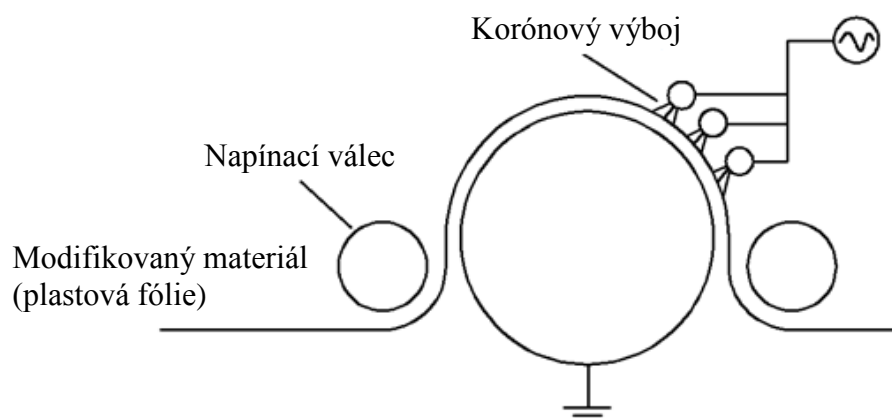
Obr. 4.1: Metody povrchových úprav polymerů. [12]

Mezi běžné metody úpravy povrchů polymerů patří především ošetření korónovým výbojem, plamenem, plazmou a chemickým leptáním. Všechny tyto metody mají za úkol zvýšit povrchovou energii a zlepšit smáčivost, což má za následek zvýšení pevnosti a zlepšení kvality lepeného spoje. [12, 15, 17, 18]

4.1 Ošetření korónovým výbojem

Ošetření korónovým výbojem je jedním z nejpoužívanějších způsobů úpravy povrchů polymerů. Koróna je v podstatě nestabilní plazma, které probíhá při atmosférickém tlaku. Ošetření pomocí koróny pracuje na principu vysokofrekvenčního napětí mezi dvěma elektrodami nebo mezi elektrodou a materiálem. Schéma úpravy korónovým výbojem je znázorněno na následujícím obrázku

(Obr. 4.2). Plastová fólie je přivedena na válec, který je obvykle potažen dielektrickým materiálem. Elektrody jsou umístěny v blízkosti povrchu fólie a na ně je přiváděno vysoké napětí. [2, 5, 8, 13]



Obr. 4.2: Schéma úpravy korónovým výbojem za účelem zvýšení povrchové energie plastové fólie. [2]

Kyslíkové a dusíkové radikály a omezené elektrony jsou urychlovány v elektrickém poli a předávají svoji energii na povrch polymeru. Vytvořené ionty penetrují povrch a atakují polymerní řetězce na povrchu materiálu, v důsledku čehož vznikají peroxidy, ketony, karboxyly a jiné sloučeniny. [2, 5, 13]

4.2 Ošetření plamenem

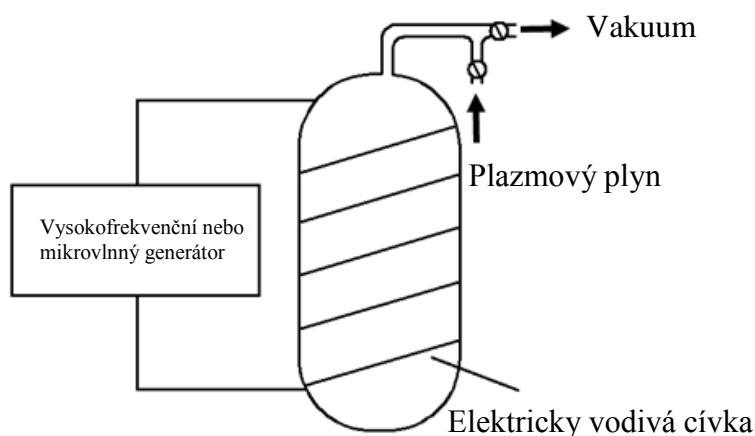
Ošetření plamenem je komerční proces, který je využíván především pro zlepšení adhezních vlastností polyolefinů. Polymer je veden přes oxidační plamen, který je tvořen směsí uhlovodíkového plynu bohatého na kyslík. Proměnné, které ovlivňují míru oxidace, zahrnují jak samotné charakteristiky plamene, tak i rychlost pohybu výrobku. [2, 8, 13]

4.3 Ošetření plazmou

Plazma (doutnavý výboj) je někdy také označována jako čtvrté skupenství látky. Jedná se o soubor nabitých částic, které obsahují pozitivní a negativní ionty, volné radikály aj. [2, 12, 24]

V roce 1966 autoři Schonhorn a Hansen [25] upozornili na vysoce účinnou metodu pro povrchovou úpravu polymerů s nízkou povrchovou energií za účelem zlepšení adhezních vlastností. Tato metoda spočívá ve vystavení povrchu polymeru účinkům působení plazmy, generovaného doutnavým výbojem (vysokofrekvenčním generátorem) (Obr. 4.3). Pro polyetylen byla nezbytná jen velmi krátká doba ošetření (přibližně 9 sekund), zatímco větší kontaktní časy byly požadovány pro jiné polymery, jako byl např. PTFE. Používané plazmové plyny (kyslík, helium, dusík) jsou zvoleny tak, aby zahrnuly široký sortiment chemických reakcí. V tomto procesu jsou atomy vyloučeny z povrchu za vzniku silné, smáčitelné a zesítené vrstvy. [2, 7, 12, 18, 24-27]

Metoda plazmové úpravy může být aplikovaná na různé plastové díly a dokonce i na práškové přísady, jako jsou pigmenty a plniva. [2, 12]



Obr. 4.3: Schéma jednoduchého ošetření plazmou. [2]

4.4 Chemické leptání

Chemické ošetření je jednou z neúčinnějších způsobů úpravy povrchu plastů před lepením. Touto metodou mohou být měněny fyzikální i chemické vlastnosti povrchu. Chemickému ošetření často předchází čištění povrchu, za účelem odstranění povrchových nečistot. Výhody čištění povrchu předem spočívá především ve snížení kontaminace chemického roztoku a v lepší interakci mezi povrchem a roztokem.

Obvykle je povrch plastového dílu omyt mýdlem a roztokem detergentu s následným ponořením do ošetřující chemické lázně (kyseliny, oxidační látky a jiné aktivní chemikálie). Následně po ošetření je plastový díl očištěn pomocí vody a sušen při zvýšené teplotě. [3, 5, 8, 12]

Tab. 4.1: Běžně používané roztoky pro ošetření polymerů. [12]

Chemický roztok	Polymery
Kyselina chromsírová*	Akrylonitril-butadien-styren (ABS), polyolefiny, polystyren, styren-akrylonitril (SAN)
Hydroxid sodný	Polystyren, polyester a polyamid
Chlornan sodný	Termoplasty a termoplastická pryž

*Leptání v roztoku kyseliny chromsírové je jednou z nejběžnějších metod.

4.5 Hodnocení účinnosti povrchových úprav

Před vlastním lepením může být účinek povrchové úpravy hodnocen např. odhadem za použití kapalin se známým povrchovým napětím nebo měřením kontaktního úhlu smáčení. Po lepení může být efektivita povrchové úpravy hodnocena měřením pevnosti lepeného spoje a také dle způsobu selhání spoje. [8, 12]

4.5.1 Metoda na základě odhadu z povrchového napětí kapalin

Tato metoda využívá kapaliny se známým povrchovým napětím. Test spočívá v umístění kapek různých kapalin (s různou hodnotou povrchového napětí) na povrch ošetřeného materiálu s následným pozorováním tvaru kapky (roztečení kapky na povrchu). Po sobě jdoucí kapaliny s různými hodnotami povrchového napětí umožňují zúžení rozsahu povrchového napětí zkoumaného povrchu. Tato metoda nepatří k těm nejpřesnějším, nicméně poskytuje rychlý způsob pro posouzení účinnosti povrchové úpravy. Alternativou této metody mohou být testovací pera, která působí na stejném principu jako kapaliny. [8, 12]

4.5.2 Měření kontaktního úhlu smáčení

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.6, tak smáčivost může být také charakterizována měřením kontaktních úhlů mezi povrchem polymeru a kapkou referenční kapaliny, jako je např. destilovaná voda. Malé kontaktní úhly značí, že kapalina účinně smáčí povrch, zatímco velké kontaktní úhly ukazují na špatné smáčení (viz. Kap. 3.6). [8, 12]

5 MODIFIKACE POLYMERŮ OZAŘOVÁNÍM

Modifikace vlastností polymerů ozařováním je neustále se rozvíjející oblastí, která si získává stále větší zájem ze strany průmyslu. Využití této metody vyžaduje plné pochopení účinků záření na polymerní materiály, které mají za cíl zlepšit jejich vlastnosti pro průmyslové aplikace. [28-30]

Mezi hlavní druhy záření, které se využívají pro modifikaci polymerů, patří především iontové a ionizační záření. Do ionizačního záření se dále řadí gama záření z radioaktivního izotopu Co-60 (^{60}Co), beta (elektronové) záření a rentgenové záření. Všechny uvedené druhy se vůči sobě značně liší (Tab. 5.1), nicméně u všech probíhá přenos energie na atomy ozařovaného materiálu. [28-33]

Tab. 5.1: Porovnání gama, beta a rentgenového záření. [28, 29]

Vlastnost	Gama záření	Beta (elektronové) záření	Rentgenové záření
Hloubka průniku	velká	nízká	velká
Výkon	nízký	vysoký	nízký
Provozní náklady	vysoké	nízké	vysoké
Rychlost ozařování	nízká	vysoká	nízká
Zdroj	radioaktivní izotop	elektrická energie	elektrická energie
Zařízení	snadná obsluha a údržba	složitá obsluha a údržba	složitá obsluha a údržba
Stínění	nepřetržité záření, vyžaduje více stínění	lze zapnout a vypnout, méně náročné na stínění	lze zapnout a vypnout, méně náročné na stínění

5.1 Ionizační beta (elektronové) záření

Ionizujícím zářením lze měnit fyzikální, mechanické a biologické vlastnosti ozařovaného materiálu. V současné době je ionizační záření nejvíce využíváno pro sterilizaci (např. výrobků ve zdravotnictví, potravin a zemědělských produktů) a taktéž k modifikaci materiálů (síťování polymerů, barvení draho-kamů). [28, 29]

U ionizačního beta záření jsou elektrony generovány za vysokého vakua pomocí žhavé katody. Elektrony emitované z katody jsou následně urychleny v elektrostatickém poli, které vzniká mezi katodou a anodou. Hloubka průniku do materiálu se zvyšuje s rostoucí energií elektronů. Závisí taktéž na hustotě ozařovaného materiálu a geometrii výrobku. Jak je patrné z předchozí tabulky (Tab. 5.1) beta záření má výrazně vyšší rychlost ozařování než záření gama, díky čemuž jsou výrobky vystaveny záření pouze v řádu několika sekund (oproti hodinám až

dnům u gama záření). Naopak hloubka průniku je u beta záření výrazně nižší (až 5 krát v porovnání s gama zářením). Ionizační beta záření je pro své výše uvedené vlastnosti nejpoužívanějším zářením určeným pro modifikaci polymerů. [28-35]

5.1.1 Měrné jednotky charakterizující ionizační záření

Mezi základní měrné jednotky charakterizující ionizační záření především patří: dávka, dávková intenzita, kinetická energie elektronu a aktivita.

Dávka je definovaná jako energie absorbovaná ozářeným materiálem o dané hmotnosti. Základní jednotkou absorbované dávky je *Gray (Gy)*. Dříve užívaná jednotka byla *rad*. [28, 36]

$$1\text{Gy} = 1\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100\text{ rad} \quad (5.1)$$

Dávková intenzita je definovaná jako přírůstek dávky za časový interval. Dříve se používal pojem dávková rychlost. Jednotkou je $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$. [36, 37]

$$1\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.2)$$

Kinetická energie elektronu – protože kinetická energie vyjádřena v joulech je velmi malé číslo, používá se z praktických důvodů jednotka *elektronvolt (eV)*. Jeden elektronvolt odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. [37]

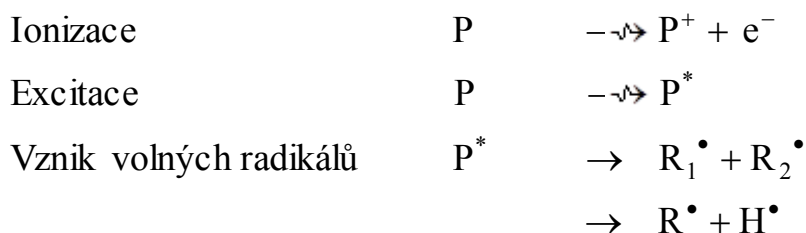
$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J} \quad (5.3)$$

Aktivita charakterizuje množství radioaktivní látky. Je to počet radioaktivních přeměn v látce vztažený na jednotku času. Jednotkou aktivity je *Becquerel (Bq)*. [28, 36, 37]

$$1\text{Bq} = 1\text{ rozpad/s} \quad (5.4)$$

5.2 Interakce ionizujícího záření s polymery

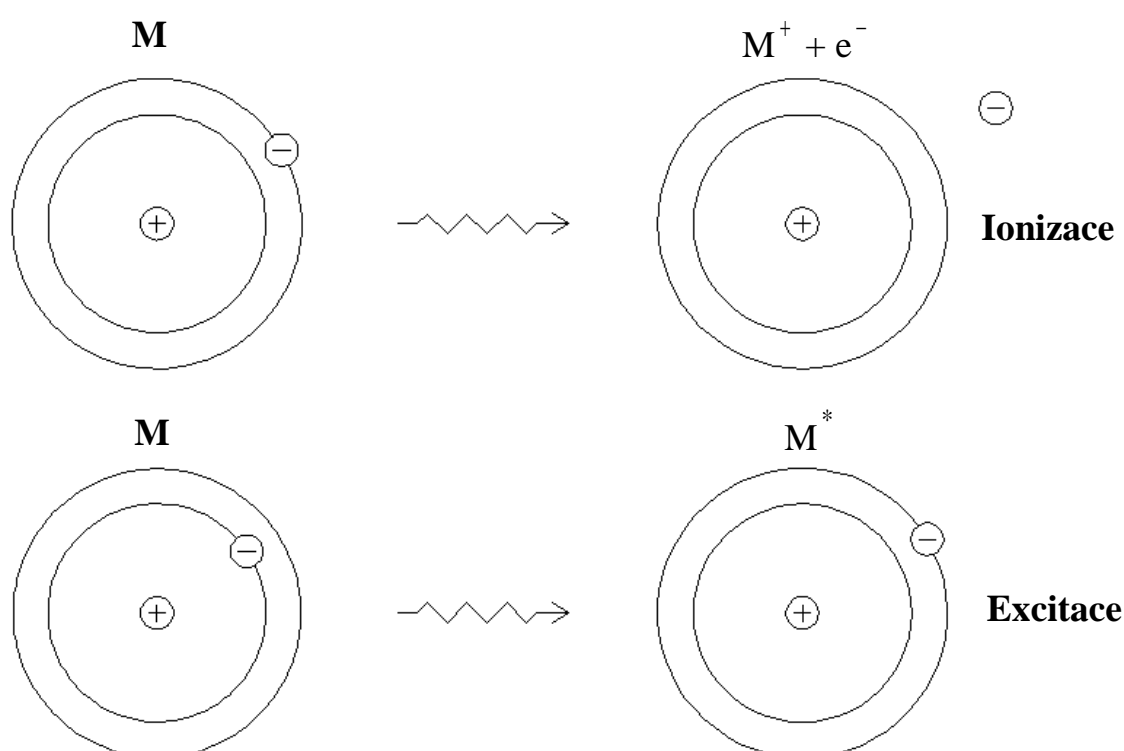
Mezi primární interakce ionizujícího záření s polymerem patří především ionizace, excitace a generování volných radikálů (Obr. 5.1), které se tvoří buď v důsledku štěpení hlavního řetězce, nebo prostřednictvím disociace C-H postranního řetězce. [28-31]



Obr. 5.1: Primární procesy (P – polymer, R – radikál). [28]

Nabitá částice při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně elektrickou Coulombovou interakcí s elektrony v atomech látky. Je-li energie předaná elektronu v atomovém obalu relativně malá a stačí jen k vyzdvižení elektronu na vyšší energetickou hladinu, jedná se o proces **excitace** atomů. Excitovaný (vzbuzený) stav atomu není stálý – vzápětí přeskočí elektron zpět na původní hladinu (nastane **dexcitace**). [37, 38]

Obdrží-li elektron dost energie na to, aby se se zcela uvolnil z vazby k mateřskému atomu, vzdálí se od něj trvale – dochází k **ionizaci** atomu (k jeho rozdělení na záporný elektron a kladný iont). Primární ionizací se rozumí počet iontových párů vytvořených vyrážením elektronů primární částicí. Některé elektrony vyrážené při ionizaci mají tolik energie, že mohou samy dále po své dráze ionizovat (jedná se o sekundární ionizaci). [37, 38]

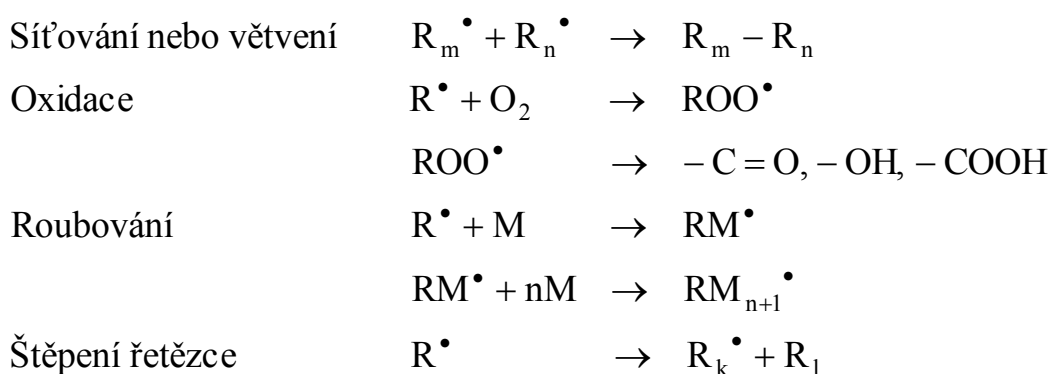


Obr. 5.2: Ionizace a excitace. [28]

Při ionizaci a excitaci ztrácí rychlá nabitá částice svou kinetickou energii udělováním hybností elektronům působením elektrických Coulombových sil. Velikost hybnosti předané elektronům je úměrná velikosti Coulombových sil a času, po který tyto síly působí (době interakce). [38]

Mezi sekundární reakce, které následují po generaci volných radikálů, patří především:

- síťování nebo větvení,
- štěpení řetězce,
- oxidace a roubování. [28, 29, 31]

Obr. 5.3: Sekundární reakce ($M = \text{monomer}$). [28]

5.3 Účinky ionizačního záření na polymerní materiály

Jak již bylo uvedeno, ve chvíli kdy je elektronový paprsek ve vzájemné interakci s polymerním materiálem, tak jeho energie je absorbována polymerem a jsou produkovány aktivní látky (radikály), v důsledku čehož jsou zahájeny různé chemické reakce. Mezi základní procesy, které jsou vyvolány v důsledku těchto reakcí, patří:

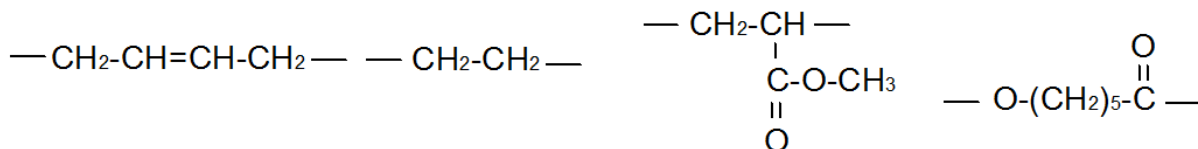
- Sít'ování, kdy se polymerní řetězce spojují, a je vytvořena síť.
- Štěpení řetězce, v jejímž důsledku je snížena molekulová hmotnost polymeru.
- Oxidace, kdy molekuly polymeru reagují s kyslíkem (oxidace a štěpení řetězců se často vyskytuje současně).
- Větvení řetězců, kdy dochází ke spojování řetězců, ale není ještě vytvořena trojrozměrná síť.
- Roubování, kdy je nový monomer polymerován a naroubován na základní řetěz polymeru. [28-35]

Různé polymery mají různé reakce na záření, zejména pokud jde o sít'ování vs. štěpení řetězců. Parametr G je hodnota, která je široce používána pro určení chemického výnosu, který vzniká v důsledku ozáření. Hodnota G je definována jako chemický výnos v počtu reagujících molekul na 100 eV absorbované energie. Tabulka 5.2 znázorňuje hodnotu G pro sít'ování $G(X)$ a štěpení řetězců $G(S)$ u běžně používaných polymerních materiálů ozářených při pokojové teplotě bez kyslíku. Materiály, u kterých je poměr $G(S)/G(X) < 1$ jsou vhodné pro sít'ování. Materiály s poměrem $G(S)/G(X) > 1$ mají obvykle větší tendenci k degradaci. Materiály, jejichž obě hodnoty $G(S)$ i $G(X)$ jsou nízké, jsou odolnější vůči záření. [28, 29, 31, 33-35]

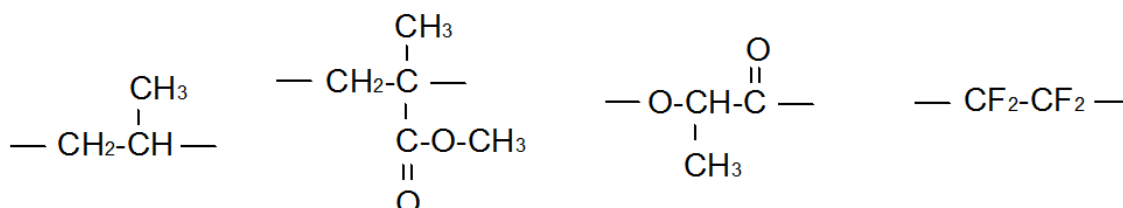
Odlišné reakce na záření pro různé polymery jsou závislé na jejich chemických strukturách. Obrázek 5.4 ukazuje některé případy chemických struktur polymerů, které mají sklon k sít'ování (a), k degradaci (b) a které jsou rezistentní vůči ozáření (c). Zjednodušeně můžeme říct, že polymer s více atomy vodíku na stranách (např. polyetylen) má v důsledku ozáření tendenci sít'ovat. Naopak polymer

s metylovou skupinou (např. polypropylen) má tendenci v důsledku ozáření spíše degradovat. Aromatické polymery s benzenovým jádrem v hlavním řetězci nebo na stranách jsou obvykle vůči ozařování rezistentní. [28-35]

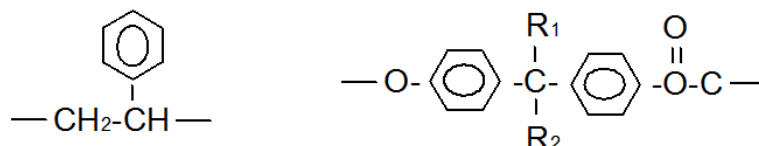
a) Ozářením síťující polymery



b) Ozářením degradující polymery



d) Polymery rezistentní vůči ozařování

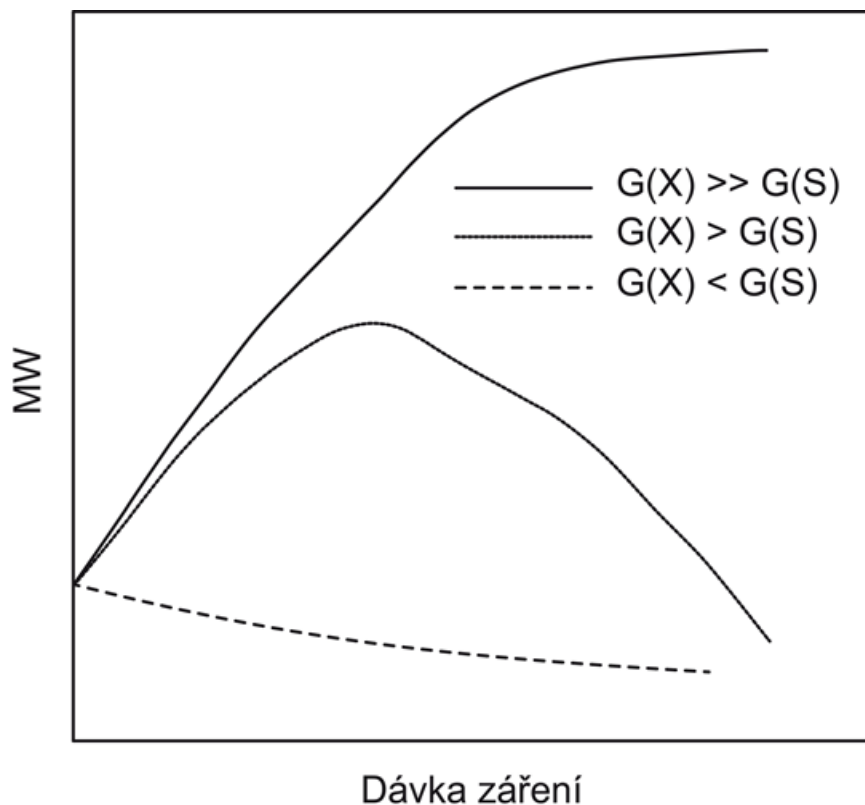


Obr. 5.4: Příklady chemických struktur polymerů s různými reakcemi na ozařování. [28]

Tab. 5.2: Hodnoty ukazatele G pro síťování a štěpení u vybraných typů polymerů. [28]

Polymer	Síťování G(X)	Štěpení G(S)	G(S)/G(X)
Nízko-hustotní polyetylen	1,42	0,48	0,34
Vysoko-hustotní polyetylen	0,96	0,19	0,20
Izotaktický polypropylen	0,16 – 0,26	0,29 – 0,31	1,1 – 1,5
Ataktický polypropylen	0,4 – 0,5	0,3 – 0,6	0,7 – 0,9
Polymethylmetakrylát	< 0,50	1,1 – 1,7	> 2
Polytetrafluoretylen	0,1 – 0,3	3,0 – 5,0	10
Přírodní kaučuk	1,3 – 3,5	0,1 – 0,2	0,14
Nylon 6,6	0,5 – 0,9	0,7 – 2,4	1,4
Polyvinylacetát	0,1 – 0,3	0,06	0,2
Polymethylakrylát	0,45 – 0,52	0,08	0,15
Polystyren	0,019 – 0,051	0,0094 – 0,019	0,4
Polybutadien	5,3	0,53	0,10
Polyisobutylen	0,05 – 0,5	5,0	> 10
Butyl kaučuk	< 0,5	2,9 – 3,7	> 6

Síťování a štěpení řetězce jsou dva konkurenční procesy, které vždy koexistují v rámci ozáření. Celkový účinek ozáření závisí na tom, který proces v daném čase převládá. Kdykoliv je parametr $G(X)$ větší než $G(S)$, tak celkový výsledek je síťování. Naopak, když je parametr $G(S)$ větší, tak celkový výsledek je degradace. Hodnoty obou parametrů pro daný polymer úzce souvisí s podmínkami ozařování, jako je např. absorbovaná dávka a teplota ozařování. Oba parametry se zvyšují se zvyšující se dávkou ozáření. Nicméně, parametr $G(S)$ se u polymerů obecně zvyšuje více nežli $G(X)$. Z tohoto důvodu mohou nastat tři různé scénáře pro vztah mezi molekulovou hmotností polymeru (MW) a dávkou záření (Obr. 5.5). [28-35]



Obr. 5.5: Vztah mezi molekulovou hmotností polymeru (MW) a dávkou záření. [28]

V případě, že hodnota $G(X)$ je mnohem větší než $G(S)$, MW se kontinuálně zvyšuje v důsledku síťování, ale poté se ustálí, protože hodnota $G(S)$ se bude zvyšovat rychleji. V případě, kdy hodnota $G(X)$ je větší, ale rozdíl oproti $G(S)$ není tak značný, tak hodnota $G(S)$ nakonec dožene $G(X)$ a na křivce MW nastane zlom a dochází ke změně celkové reakce ze síťování na degradaci. Ke kontinuální degradaci dochází ve chvíli, kdy hodnota $G(S)$ je větší než $G(X)$. [28, 29, 31-35]

5.4 Výhody a nevýhody ozařování polymerů

Ve srovnání s chemickými metodami na úpravu vlastností polymerních materiálů, které mají podobné účinky, vykazuje ozařování při vzájemném srovnání jak výhody, tak i určitá omezení, na které se musím brát zřetel. [28, 29]

Mezi výhody patří především vyšší výkon, úspora energie (zpracování probíhá při pokojové teplotě), nižší citlivost na vlhkost, vyšší čistota a nižší toxicita procesu. [18-31]

Ozařování polymerů má také několik nevýhod a limitujících činitelů. Mezi hlavní nevýhody patří především obvykle vysoká finanční nákladnost celého ozařovacího systému, která vyžaduje značné kapitálové investice. [28, 29]

I přes zmíněná negativa je potenciál modifikace vlastností polymerů ozařováním značný, protože výhody této metody vysoce převyšují nevýhody a vlastnosti dosažené touto metodou dosahují stejné, nebo dokonce v některých případech i vyšší kvality, v porovnání s konkurenčními metodami. [28-35]

6 CÍL PRÁCE

Stejně i jako jiné metody spojování materiálů, vyznačuje se i lepení některými nevýhodami a limitujícími činiteli. Mezi hlavní nedostatek lepení patří především nutnost povrchové úpravy u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi. Mezi takové materiály patří především polyetylen a polypropylen, které téměř nelze bez předchozí úpravy povrchu lepit. Aby bylo možno získat kvalitní lepený spoj, je nutné povrchy těchto materiálů vhodným způsobem aktivovat a zvýšit tak smáčecí schopnost a zlepšit adhezní vlastnosti. Jednou z možností jak lze efektivně modifikovat povrchy výše zmíněných materiálů před lepením je ozáření ionizačním beta zářením. Tato metoda není pro účely lepení zatím používaná a absence relevantních informací v tomto směru byla hlavní motivací pro studium modifikace povrchů vybraných polymerů ozařováním a jeho vlivu na pevnost lepených spojů.

Hlavním cílem této disertační práce je tedy prozkoumat vliv ionizačního beta záření na pevnost lepených spojů a povrchových vlastností vybraných typů polymerů a následně porovnat výsledky této metody s běžně používanými metodami modifikace povrchů (aktivace nízkotlakou plazmou).

Postup při řešení disertační práce:

- Volba vhodných typů polymerních materiálů.
Při volbě polymerních materiálů zohlednit vhodnost pro radiační síťování po konzultacích s výrobcí radiačně síťovatelných materiálů.
- Výroba a příprava zkušebních těles.
Zkušební tělesa vyrobit vstříkáním za dodržení vstříkovacích podmínek předepsaných výrobcí a připravit je pro konstrukci lepených spojů.
- Modifikace zkušebních těles ionizačním beta zářením.
Vyrobená zkušební tělesa modifikovat ionizačním beta zářením při širokém rozsahu dávek záření.
- Měření kontaktních úhlů smáčení.
Změřit kontaktní úhly smáčení za použití metody přisedlé kapky a tří referenčních kapalin (destilovaná voda, glycerin a etylenglykol).
- Výpočet povrchových energií.
Určit povrchové energie z kontaktních úhlů smáčení.

- Stanovení obsahu zesíťované fáze (gelu).
Určit obsah gelové fáze za využití gelové zkoušky.
- Určení zastoupení kyslíkatých funkčních skupin (karbonylových, hydroxylových aj.) v závislosti na dávce záření.
Stanovit relativní zastoupení karbonylových a hydroxylových skupin za využití infračervené spektrometrie.
- Konstrukce lepených spojů.
Z vyrobených a modifikovaných zkušebních těles zkonstruovat lepené spoje za využití širokého spektra v současné době průmyslově využívaných lepidel.
- Provedení zkoušek pevností lepených spojů.
U zhotovených lepených spojů provést měření jejich pevnosti za využití tahové zkoušky.
- Porovnání pevností lepených spojů modifikovaných ionizačním beta zářením s běžně používanými metodami úpravy povrchu před lepením (modifikace povrchů nízkotlakou plasmou).
- Vyhodnocení získaných výsledků.
Vyhodnocení experimentů a naměřených dat.

7 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Jak již bylo uvedeno, mezi hlavní nedostatek lepení patří především nutnost povrchových úprav u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi. Tato disertační práce se zabývá účinkem ionizačního beta záření na povrchové a adhezní vlastnosti a na výslednou pevnost lepených spojů.

7.1 Volba polymerních materiálů

Jako materiály byly zvoleny tři zástupci skupiny polyolefinů, což jsou materiály, které jsou charakteristické obtížnou lepitelností. Jedná se o dva typy polyetyleny, a to nízko-hustotní (LDPE) a vysoko-hustotní (HDPE), a jeden typ polypropylen (PP). K zajištění síťování byl u testovaného polypropylen použit polyfunkční monomer s označením TAIC (triallylisokyanurát), který má za úkol iniciovat v polymeru požadované síťovací reakce. Celý proces přípravy granulátu s polyfunkčním monomerem byl realizován ve firmě PTS Plastic Technology Service.

Níže je uvedeno označení zvolených materiálů:

- **LDPE** (DOW LDPE 780E)
- **HDPE** (DOW HDPE 25055E)
- **PP** (V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800)

Jak již bylo zmíněno, tyto materiály jsou známy svým nepolárním charakterem a špatnými adhezními vlastnostmi, v důsledku kterých je téměř nelze bez předchozí úpravy lepit. Vybrané vlastnosti zvolených materiálů jsou zobrazeny v tabulkách 7.1, 7.2 a 7.3.

Tab. 7.1: Vybrané vlastnosti materiálu LDPE (DOW LDPE 780 E). [40]

DOW LDPE 780E	
Hustota	0,923 g/cm ³
Index toku taveniny (190 °C/2,16 kg)	20 g/10 min
Průměrné smrštění	1,9 %
Modul pružnosti	164 MPa
Pevnost v tahu	10,5 MPa
Protažení při přetržení	50 %
Rázová pevnost v tahu	286 kJ/m ²
Tvrdost (Shore D)	49

Tab. 7.2: Vybrané vlastnosti materiálu HDPE (DOW HDPE 255 55 E). [41]

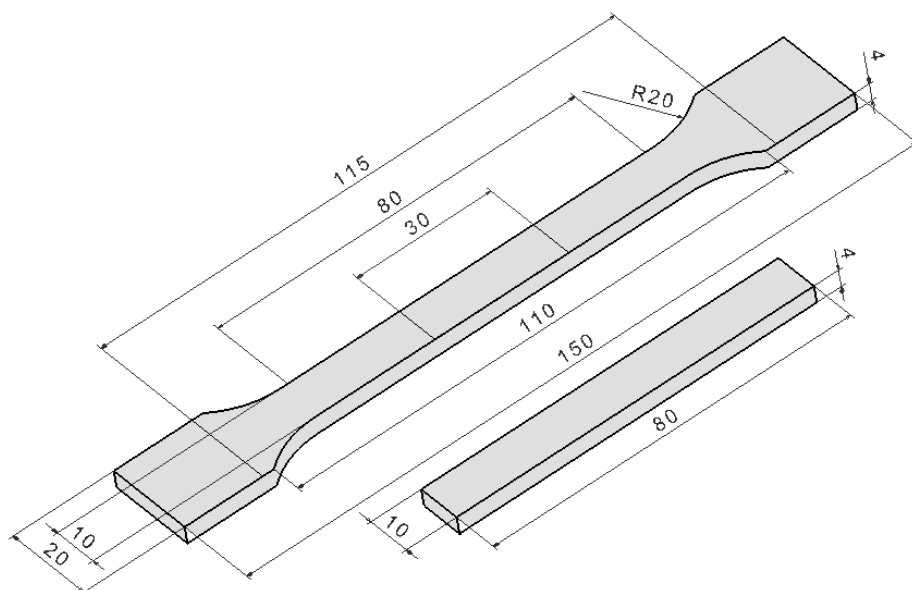
DOW HDPE 25055E	
Hustota	0,953 g/cm ³
Index toku taveniny (190 °C/2,16 kg)	25 g/10 min
Smrštění	2,1 %
Pevnost v tahu	27 MPa
Tvrдость (Shore D)	65
Rázová pevnost v tahu	55 kJ/m ²
Tvrдость (Shore D)	49
Teplota měknutí (Vicat)	124 °C

Tab. 7.3: Vybrané vlastnosti materiálu PP (V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800). [42]

V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800	
Hustota	0,9 g/cm ³
Modul pružnosti	1100 MPa
Vrubová houževnatost (Charpy)	8,3 kJ/m ²
Rázová houževnatost	120 kJ/m ²
Ohybová pevnost	25 MPa
Protažení při přetržení	127 %

7.2 Výroba a příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa určená pro konstrukci lepených spojů byla vyrobena na vstřikovací stroji Arburg Allrounder 420 C. Tvar a rozměry jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 7.1). Parametry vstřikovacího procesu byly stanoveny dle doporučení výrobců materiálů (Tab. 7.4).



Obr. 7.1: Zkušební tělesa určená pro konstrukci lepeného spoje.

Tab. 7.4: Vstřikovací parametry použitých materiálů.

Procesní podmínky	LDPE	HDPE	PP
Vstřikovací rychlost [mm/s]	50	60	50
Vstřikovací tlak [MPa]	60	80	80
Čas vstřikování [s]	0,4	0,4	0,5
Čas chlazení [s]	30	20	40
Teplota formy [°C]	40	40	50
Dráha dávkování [mm]	28	40	40
Dotlak [MPa]	50	60	8
Celkový čas dotlaku [s]	30	25	5
Teploty pásem plastikační jednotky			
Teplota pod násypkou [°C]	60	60	40
Teplotní pásmo 1 [°C]	190	200	210
Teplotní pásmo 2 [°C]	200	205	220
Teplotní pásmo 3 [°C]	210	210	230
Teplotní pásmo 4 [°C]	215	225	240

7.3 Modifikace zkušebních těles ionizačním beta zářením

Z důvodu zlepšení smáčivosti a adhezních vlastností byla zkušební tělesa ošetřena ionizačním beta zářením. Ozáření bylo provedeno v Německu ve spolupráci se společností BGS GmbH & Co. KG. Zdrojem beta (elektronového) záření byl vysokonapěťový urychlovač typu Rhodotron o maximální energii 10 MeV. Z provozních důvodů urychlovače a souvisejících zařízení byly použity následující dávky záření:

- **Materiály LDPE a HDPE** – dávky záření 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy.
- **Materiál PP** – dávky záření 33, 66 a 99 kGy.

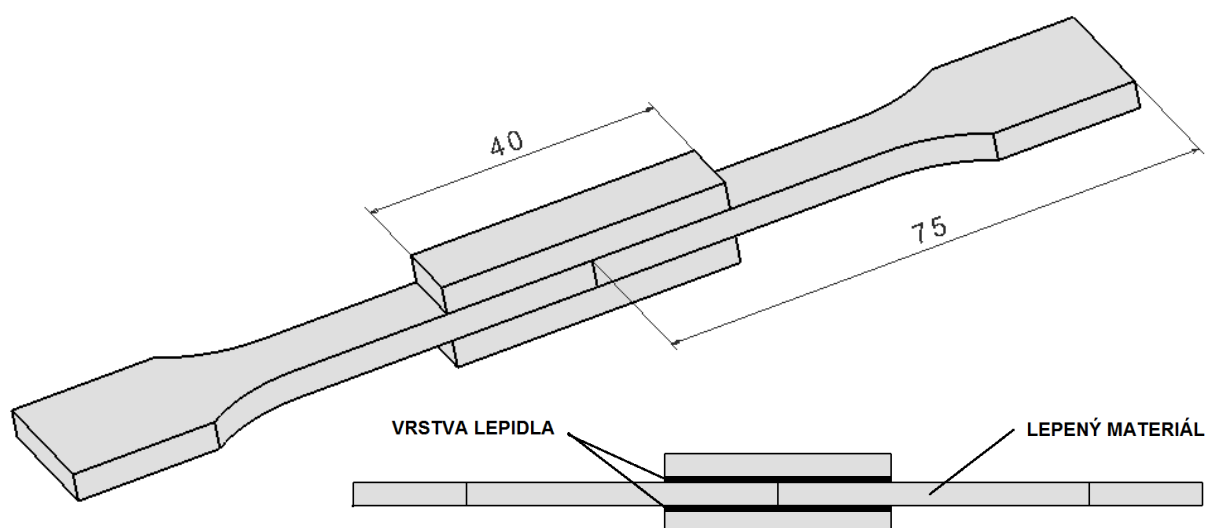
7.4 Konstrukce lepeného spoje

Pro zkoušky pevnosti lepených spojů byl vybrán dvojitě přeplátovaný spoj (Obr. 7.2), který byl vytvořen ze zkušebních těles vyrobených na vstřikovacím stroji (Obr. 7.1).

Pro konstrukci lepeného spoje bylo využito širokého spektra dostupných lepidel. Jejich seznam a označení je zobrazeno v tabulce 7.5.

Tab. 7.5: Seznam a označení použitých lepidel.

TYP LEPIDLA	VÝROBCE LEPIDLA	OZNAČENÍ LEPIDLA
KYANOAKRYLÁTOVÁ LEPIDLA	Cyberbond	1008
	Cyberbond	2008
	Cyberbond	2028
	Cyberbond	5008
2-KOMPONENTNÍ METAKRYLÁTOVÁ LEPIDLA	Plexus	MA300
	Plexus	MA832
	Cyberbond	A806
2-KOMPONENTNÍ EPOXIDOVÉ LEPIDLO	Cyberbond	E705



Obr. 7.2: Lepený spoj.

Základní vlastnosti použitých lepidel jsou shrnuty v následujících tabulkách (Tab. 7.6, 7.7 a 7.8).

Tab. 7.6.: Základní vlastnosti použitých kyanoakrylátových lepidel. [43-46]

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI Monomerní kyanoakrylát (tekutý)	CYBERBOND			
	1008	2008	2028	5008
Základní monomer	Etylester	Etylester	Etylester	Alkoxyester
Vzhled	bezbarvý/ čirý	bezbarvý/ čirý	bezbarvý/ čirý	bezbarvý/ čirý
Viskozita při 25 °C [mPa·s]	9 – 15	12 – 18	160 – 240	45 – 80
Hustota při 20 °C [g/cm ³]	1,09	1,06	1,05	1,07
Bod vzplanutí [°C]	80	85	85	112
Doba potřebná pro vytvoření manipulační pevnosti spoje – kov (ocel) [s]	20 – 35	18 – 28	20 – 35	35 – 70
Doba potřebná pro vytvoření manipulační pevnosti spoje – plast (ABS) [s]	4 – 6	2 – 4	2 – 4	14 – 17
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI Monomerní kyanoakrylát (pevný)				
Pevnost v tahu na NBR (guma) [N/cm ²]	*64	*66	*64	*60
Smyková pevnost na oceli [N/mm ²]	10 – 22	11 – 20	12 – 22	8 – 18
Teplotní odolnost (polymer) [°C]	-55 do +95	-55 do +95	-55 do +95	-30 do +70

*porušení materiálu

Tab. 7.7: Základní vlastnosti použitých 2-komponentních metakrylátových lepidel. [47-49]

FYZIKÁLNÍ/CHEMICKÉ VLASTNOSTI A + B směs (tekutá)	CYBERBOND A806	PLEXUS MA300	PLEXUS MA832
Viskozita [mPa·s]	60 000	40 000 – 60 000	*90 000 – 120 000 **25 000 – 35 000
Barva	mléčná/bílá	bílá/žlutá	bílá/šedá
Poměr míšení	1:1	1:1	10:1
Doba zpracovatelnosti (po smíchání složek) [min]	10 – 20	4 – 6	12 – 16
Doba potřebná pro vytvoření mani- pulační pevnosti spoje [min]	30	12 – 15	50 – 60
FYZIKÁLNÍ/MECHANICKÉ VLASTNOSTI Polymer (stálý)			
Pevnost v tahu [N/mm ²]	–	20 – 24	24 – 27
Smyková pevnost na oceli [N/mm ²]	20 – 30	–	–
Teplotní odolnost [°C]	-40 do +120	-55 do +121	-40 do +82

*lepidlo, **aktivátor

Tab. 7.8: Základní vlastnosti použitého epoxidového lepidla. [50]

VLASTNOSTI	Cyberbond E705
Základ lepidla	epoxid
Viskozita [mPa·s]	10 000
Hustota při 20 °C [g/cm ³]	1,2
Barva	světle žlutá
Doba zpracovatelnosti [min]	5 – 8
Doba potřebná pro vytvoření manipulační pevnosti spoje [min]	15
Poměr míšení	1:1
Pevnost ve smyku [N/mm ²]	10
Teplotní odolnost [°C]	-40 do +95

7.5 Provedené zkoušky

Pro posouzení vlivu ionizačního beta záření na povrchové vlastnosti a výslednou pevnost lepených spojů byly provedeny následující zkoušky:

- **Měření kontaktních úhlů smáčení** (metoda přisedlé kapky)
- **Stanovení povrchových energií** (metoda OWRK)
- **Gelová zkouška** (stanovení obsahu zesíťované fáze)
- **Infračervená spektrometrie** (zastoupení funkčních skupin – hydroxylových a karbonylových)
- **Tahová zkouška** (určení pevnosti lepených spojů po ošetření zkušebních těles ionizačním beta zářením a jejich porovnání s běžně používanými metodami modifikace povrchů (aktivace nízkotlakou plazmou).

8 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Hlavním cílem této disertační práce bylo prozkoumat vliv ionizačního beta záření na povrchové a adhezni vlastnosti a na výslednou pevnost lepených spojů u vybraných typů polymerů. Při vyhodnocení naměřených výsledků bylo využito sloupcových a spojnicových grafů. Spojovací úsečky ve spojnicových grafech nevyjadřují lineární chování, ale slouží pouze ke zvýraznění trendu.

8.1 Kontaktní úhel smáčení

První měřenou veličinou byl kontaktní úhel smáčení, který charakterizuje smáčecí schopnost lepených povrchů (Kap. 3.6, Obr. 3.3). Měření bylo provedeno metodou přisedlé kapky (Kap. 3.6.1) na zařízení See System od firmy Advex Instruments. Samotné měření probíhalo dle normy ČSN EN 15802 [51] za použití tří kapalin (destilovaná voda, glycerin, etylenglykol) s rozdílnou hodnotou povrchového napětí (γ). [52, 53] Měření bylo uskutečněno při pokojové teplotě (23 °C) s opakovatelností minimálně 10.

Tab. 8.1: Hustota a povrchové napětí použitých kapalin. [54]

Použité kapaliny	Hustota [g/cm ³]	Povrchové napětí (γ) [mJ/m ²]
Destilovaná voda	0,997	72,7
Glycerin	1,258	65,2
Etylenglykol	1,113	47,7

Jak je známo z literatury [2, 5, 8, 12, 18], výsledky kontaktních úhlů smáčení jsou velmi důležité pro samotné lepení, protože základním předpokladem pro vytvoření kvalitního lepeného spoje je právě dostatečná smáčivost lepeného povrchu.

Pro grafickou prezentaci výsledků bylo využito sloupcových grafů aritmetického průměru (Rov. 8.1) s vyznačenou příslušnou chybou měření prezentovanou střední chybou průměru (Rov. 8.2). [55, 56]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n(n-1)}} \quad (8.2)$$

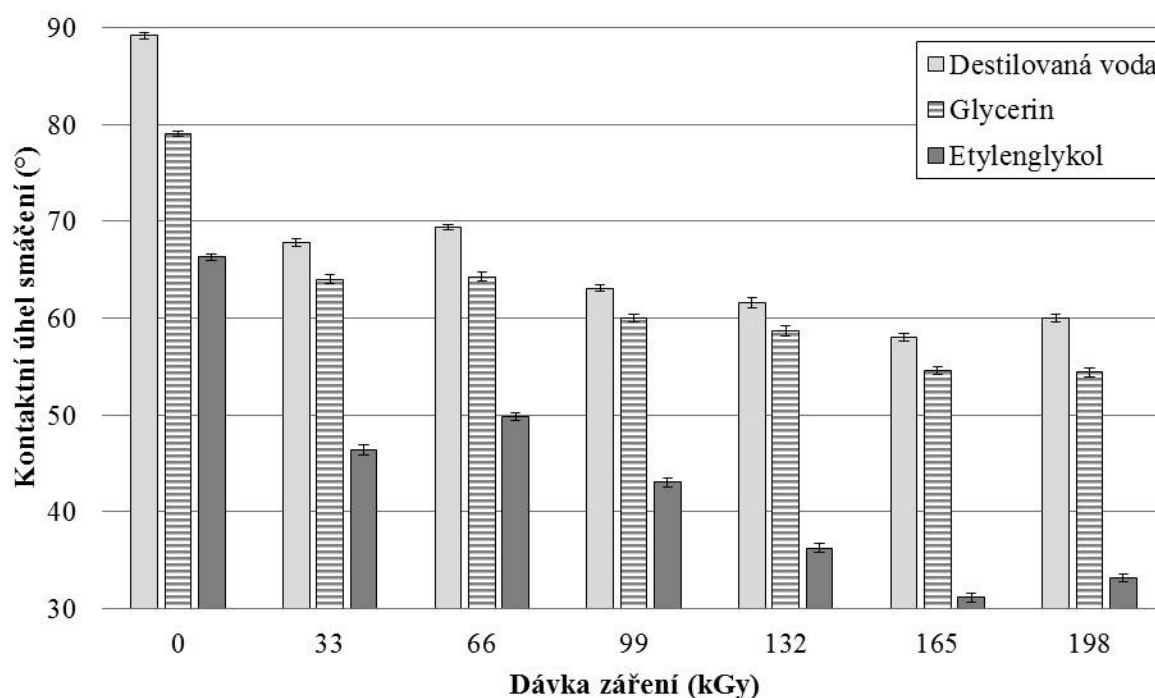
8.1.1 Materiál HDPE

Výsledky měření u materiálu HDPE ukazují (Tab. 8.2, Obr. 8.1), že ionizační beta záření výrazně zlepšuje smáčivost, což je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení. Pokles byl zaznamenán u všech použitých kapalin.

Tab. 8.2: Kontaktní úhly smáčení u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

HDPE							
Kapalina	Dávky záření (kGy)						
	0	33	66	99	132	165	198
Destilovaná voda	(89,2±0,3)°	(67,8±0,4)°	(69,4±0,3)°	(63,1±0,4)°	(61,6±0,5)°	(58,0±0,4)°	(60,0±0,4)°
Glycerin	(79,1±0,3)°	(64,0±0,4)°	(64,3±0,4)°	(60,4±0,4)°	(58,7±0,5)°	(54,6±0,4)°	(54,4±0,4)°
Etylenglykol	(66,3±0,4)°	(46,4±0,5)°	(49,8±0,4)°	(43,0±0,5)°	(36,2±0,4)°	(31,1±0,5)°	(33,1±0,4)°

Nejvyšší hodnoty kontaktních úhlů smáčení u materiálu HDPE byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 89,2° (pro destilovanou vodu), 79,1° (pro glycerin) a 66,3° (pro etylenglykol). K výraznému poklesu dochází již při ošetření dávkou 33 kGy, nicméně nejnižších hodnot bylo dosaženo ozáření dávkou 165 kGy, díky které klesly na 58,0° (pro destilovanou vodu), 54,6° (pro glycerin) a na 31,1° (pro etylenglykol).



Obr. 8.1: Kontaktní úhel smáčení materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

Ošetření dávkou 198 kGy již nemá tak pozitivní efekt, naopak dochází k mírnému zvýšení kontaktních úhlů u všech použitých kapalin (Tab. 8.2, Obr. 8.1).

Z naměřených výsledků (Tab. 8.2, Obr. 8.1) se ošetření ionizačním beta zářením jeví jako efektivní způsob ke zlepšení smáčivosti povrchu materiálu HDPE, které je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení. Na obrázku 8.2 lze vidět kapky referenčních kapalin na neošetřeném povrchu a na povrchu, který byl modifikován dávkou 165 kGy.



Obr. 8.2: Kapka kapaliny na povrchu materiálu HDPE.

8.1.2 Materiál LDPE

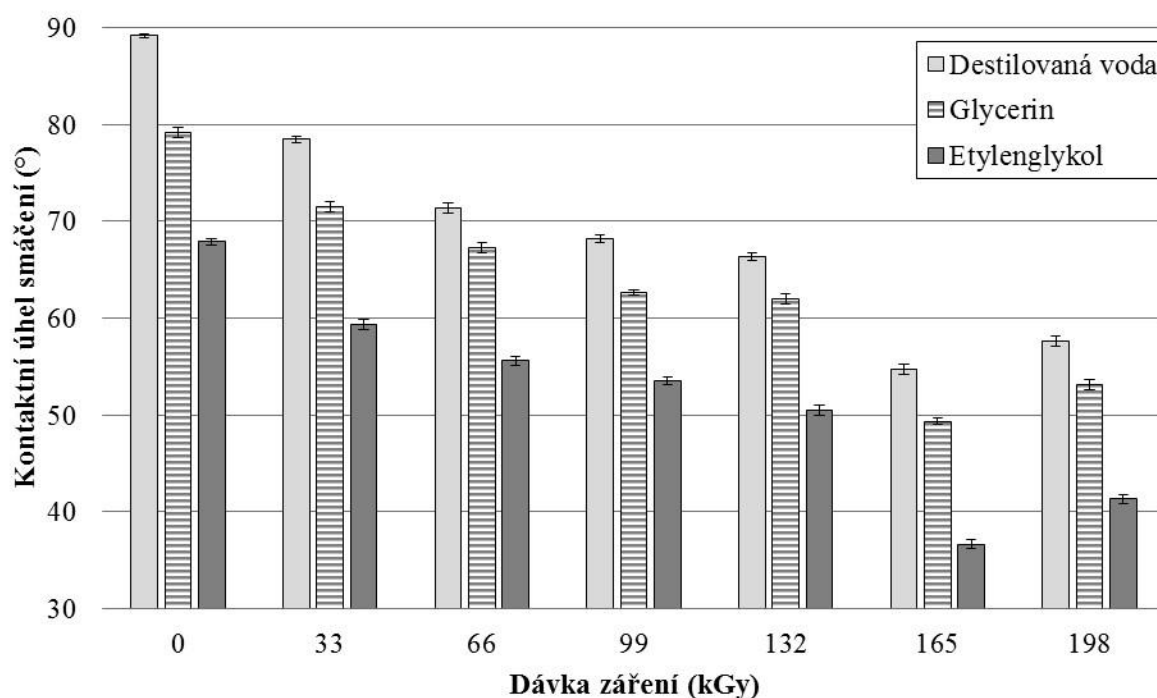
Při porovnání ozářeného a neozařeného materiálu LDPE je patrné (Tab. 8.3, Obr. 8.3), že ionizační beta záření výrazně zlepšuje smáčivost, což je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení, který byl zaznamenán u všech použitých kapalin.

Tab. 8.3: Kontaktní úhly smáčení u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

LDPE							
Kapalina	Dávky záření (kGy)						
	0	33	66	99	132	165	198
Destilovaná voda	(89,2±0,3)°	(78,5±0,3)°	(71,4±0,6)°	(68,2±0,4)°	(66,4±0,4)°	(54,7±0,5)°	(57,6±0,5)°
Glycerin	(79,2±0,5)°	(71,5±0,5)°	(67,3±0,6)°	(62,7±0,3)°	(62,0±0,5)°	(49,3±0,3)°	(53,1±0,5)°
Etylenglykol	(67,9±0,3)°	(59,3±0,5)°	(55,6±0,4)°	(53,5±0,4)°	(50,5±0,5)°	(36,6±0,5)°	(41,3±0,4)°

Z obrázku 8.3 lze vypozařovat, že nejvyšší hodnoty kontaktních úhlů smáčení u materiálu LDPE byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 89,2° (pro destilovanou vodu), 79,2° (pro glycerin) a 67,9° (pro etylenglykol).

Se zvyšující se dávkou záření dochází i k výraznému poklesu kontaktních úhlů, přičemž nejnižších hodnot bylo opět dosaženo ozářením dávkou 165 kGy, díky které klesly na $54,7^\circ$ (pro destilovanou vodu), $49,3^\circ$ (pro glycerin) a na $36,6^\circ$ (pro etylenglykol).



Obr. 8.3: Kontaktní úhel smáčení materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

Ošetření dávkou 198 kGy taktéž, jako v přechodím případě, již nemá tak pozitivní efekt, naopak opět dochází k mírnému zvýšení kontaktních úhlů u všech použitých kapalin (Tab. 8.3, Obr. 8.3).

Na obrázku 8.4 lze vidět kapky referenčních kapalin na neošetřeném povrchu a na povrchu, který byl modifikován dávkou 165 kGy.



Obr. 8.4: Kapka kapaliny na povrchu materiálu LDPE.

Z naměřených výsledků (Tab. 8.3, Obr. 8.3) se ošetření ionizačním beta zářením jeví jako efektivní způsob ke zlepšení smáčivosti povrchu materiálu LDPE, které je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení.

8.1.3 Materiál PP

U materiálu PP výsledky měření ukazují (Tab. 8.4, Obr. 8.5), že ionizační beta záření, obdobně jako v předchozích dvou případech, výrazně zlepšuje smáčivost materiálu, což je opět charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení, který byl zaznamenán u všech použitých kapalin.

Tab. 8.4: Kontaktní úhly smáčení u materiálu PP v závislosti na dávce záření.

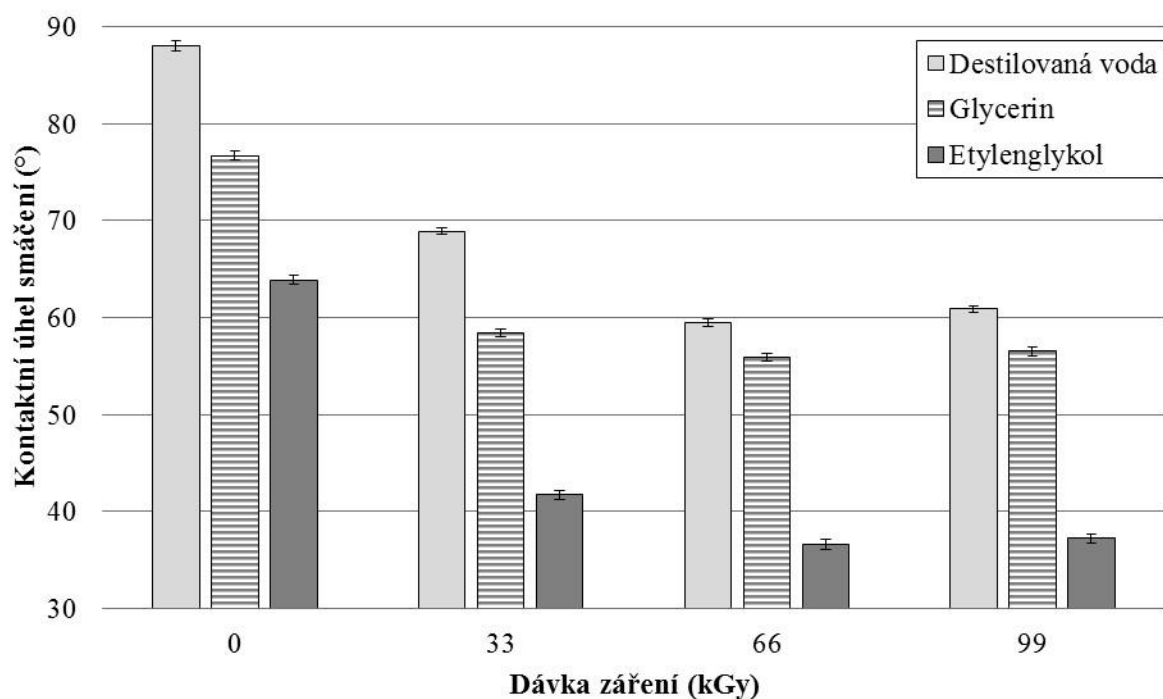
PP				
Kapalina	Dávky záření (kGy)			
	0	33	66	99
Destilovaná voda	(88,1±0,5)°	(68,9±0,4)°	(59,5±0,4)°	(60,9±0,4)°
Glycerin	(76,7±0,4)°	(58,4±0,4)°	(55,9±0,5)°	(56,5±0,4)°
Etylenglykol	(63,9±0,5)°	(41,7±0,5)°	(36,6±0,4)°	(37,2±0,5)°

Nejvyšší hodnoty kontaktních úhlů smáčení u materiálu PP byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 88,1° (pro destilovanou vodu), 76,7° (pro glycerin) a 63,9° (pro etylenglykol). Značný pokles byl zaznamenán již při dávce záření 33 kGy, nicméně nejnižších hodnot bylo dosaženo ozářením dávkou 66 kGy, díky které klesly na 59,5° (pro destilovanou vodu), 55,9° (pro glycerin) a na 36,6° (pro etylenglykol).

Ošetření dávkou 99 kGy, již nemá tak pozitivní efekt, naopak dochází k mírnému zvýšení kontaktních úhlů u všech použitých kapalin (Tab. 8.4, Obr. 8.5).

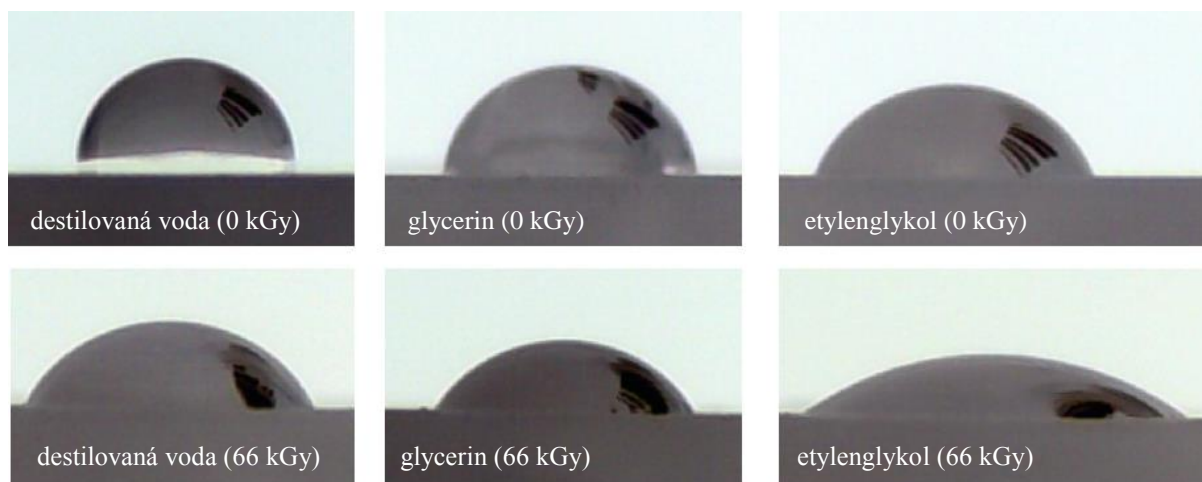
Z naměřených výsledků (Tab. 8.4, Obr. 8.5) se ošetření ionizačním beta zářením jeví jako efektivní způsob ke zlepšení smáčivosti povrchu materiálu PP, které je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení.

U materiálu PP nebyl studován případný vliv polyfunkčního monomeru (TAIC), který daný polymer obsahoval.



Obr. 8.5: Kontaktní úhel smáčení materiálu PP v závislosti na dávce záření.

Na obrázku 8.6 lze vidět kapky referenčních kapalin na neošetřeném povrchu a na povrchu, který byl modifikován dávkou 165 kGy.



Obr. 8.6: Kapka kapaliny na povrchu materiálu PP.

8.2 Volná povrchová energie

Z teorie smáčení (Kap. 2.1.5) je známo, že pro vznik kvalitního lepeného spoje by měl mít lepený materiál vyšší povrchovou energii nežli použité lepidlo, což je také jeden z důvodů proč se musí povrchy zvolených materiálů (HDPE, LDPE a PP) před lepením vhodným způsobem modifikovat.

Pro stanovení povrchových energií byla použita metoda OWRK (Owens-Wendt-Raeble-Kaeble) a bylo vycházeno z naměřených kontaktních úhlů smáčení

(Kap. 3.7). Pro vyhodnocení naměřených výsledků bylo využito softwaru See System.

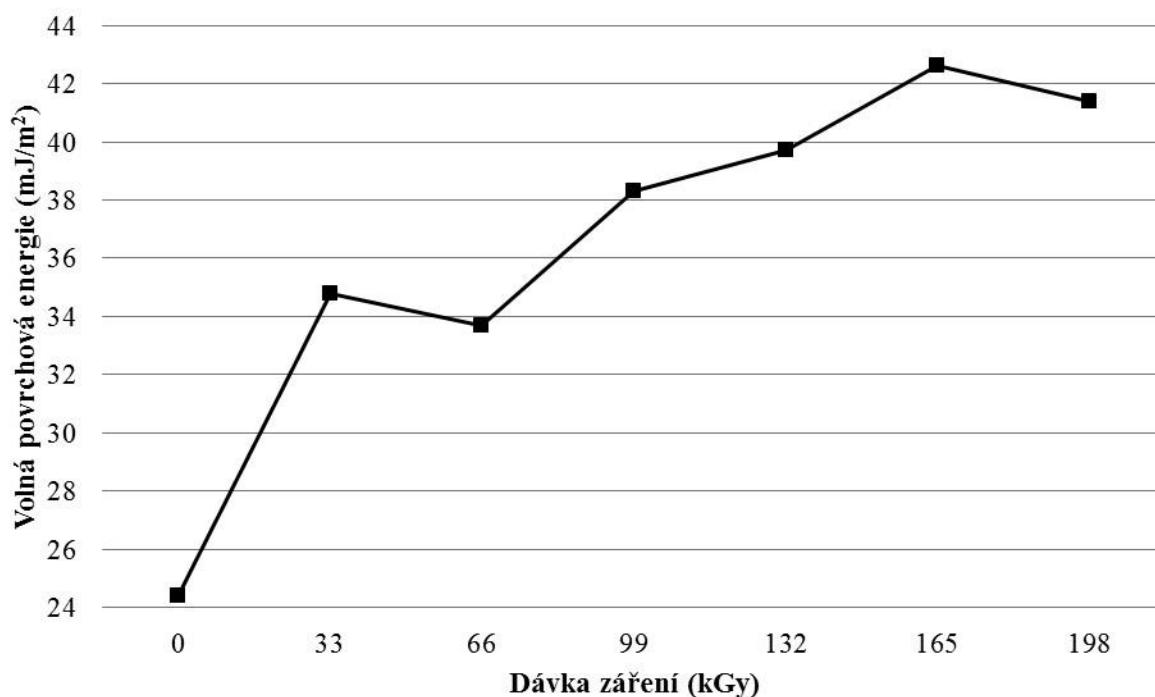
8.2.1 Materiál HDPE

Při porovnání ozářeného a neozařeného materiálu HDPE je patrné (Tab. 8.5, Obr. 8.7 a 8.8), že ionizační beta záření výrazně zvyšuje povrchovou energii a také její polární složku, která má významný vliv na adhezní vlastnosti. V důsledku nárůstu povrchové energie (a její polární složky) dochází ke zlepšení adhezních vlastností materiálu HDPE. V tabulce 8.5 lze vidět hodnoty volné povrchové energie (γ_s) a její polární (γ_s^p) a disperzní složky (γ_s^d) pro kombinace kapalin destilovaná voda + glycerin a destilovaná voda + etylenglykol a také hodnoty z regresního modelu OWRK, které jsou pak následně vyneseny do grafů (Obr. 8.7 a 8.8).

Tab. 8.5: Volná povrchová energie u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

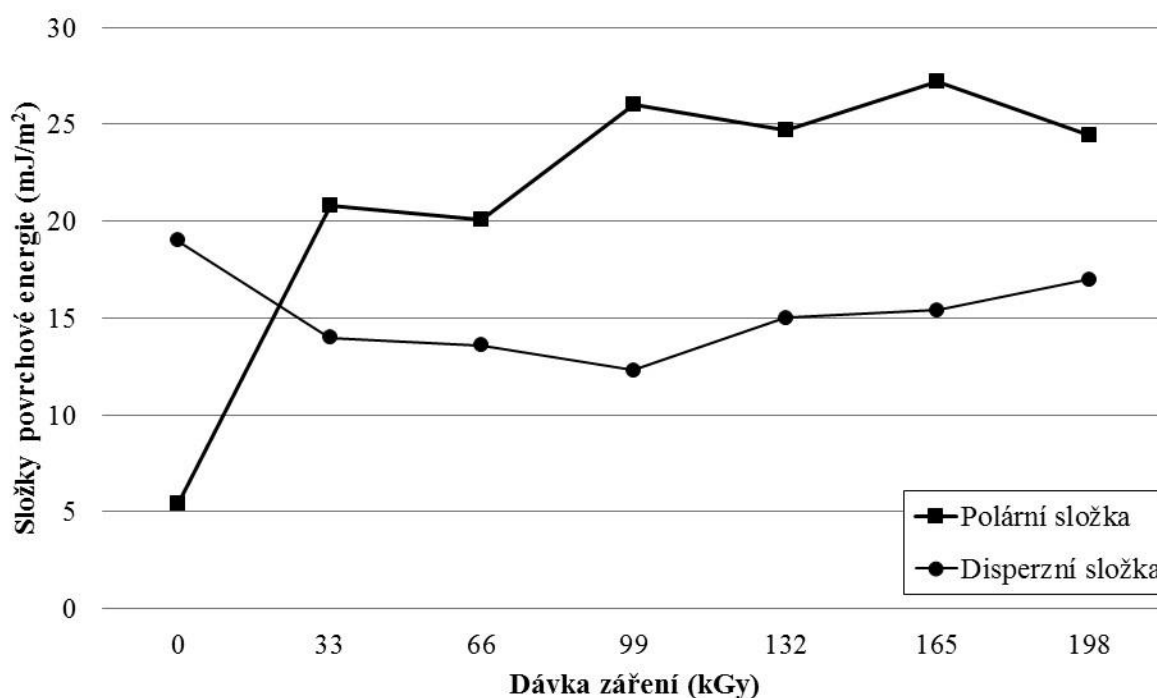
HDPE								
Kapaliny	Povrchová energie a její složky (mJ/m ²)	Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
OWRK model destilovaná voda + glycerin	γ_s	24,2	34,6	33,6	38,5	39,7	42,6	41,2
	γ_s^p	5,4	23,2	20,6	28,1	28,7	30,5	26,0
	γ_s^d	18,8	11,4	13,0	10,4	11,0	12,1	15,2
OWRK model destilovaná voda + etylenglykol	γ_s	24,5	35,2	33,8	38,5	40,4	43,1	41,8
	γ_s^p	5,3	19,8	19,9	25,2	23,0	25,8	23,7
	γ_s^d	19,2	15,4	13,9	13,3	17,4	17,3	18,1
OWRK model – regresní	γ_s	24,4	34,8	33,7	38,3	39,7	42,6	41,4
	γ_s^p	5,4	20,8	20,1	26,0	24,7	27,2	24,4
	γ_s^d	19,0	14,0	13,6	12,3	15,0	15,4	17,0

Z tabulky 8.5 a obrázku 8.7 lze vypočítat, že nejnižší hodnoty volné povrchové energie u materiálu HDPE byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 24,2 mJ/m² (pro destilovanou vodu + glycerin), 24,5 mJ/m² (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a 24,4 mJ/m² (pro regresní model). S rostoucí dávkou záření dochází k nárůstu povrchové energie. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo ozářením dávkou 165 kGy, díky které vzrostly na 42,6 mJ/m² (pro destilovanou vodu + glycerin), 43,1 mJ/m² (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a na 42,6 mJ/m² (pro regresní model), což je nárůst přibližně o 75 % oproti neošetřenému materiálu.



Obr. 8.7: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

Podobný trend jako u volné povrchové energie byl pozorován také u její polární složky. Její hodnota vzrostla dle regresního modelu OWRK z 5,4 mJ/m² (u neošetřeného materiálu) na 27,2 mJ/m² (u materiálu ozářeného dávkou 165 kGy), což je nárůst přibližně o 400 % (Obr. 8.8).



Obr. 8.8: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

Z naměřených výsledků (Tab. 8.5, Obr. 8.7 a 8.8) se ošetření ionizačním beta zářením jeví jako efektivní způsob ke zlepšení adhezních vlastností materiálu HDPE, které je charakterizováno výrazným zvýšením volné povrchové energie a její polární složky.

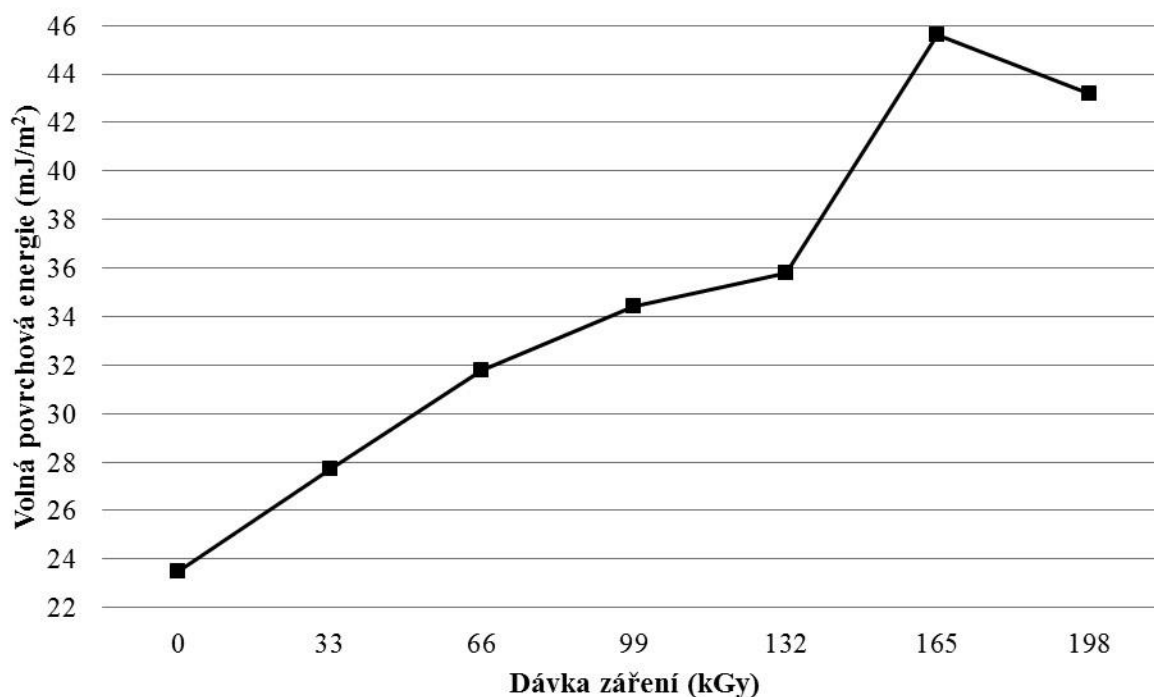
8.2.2 Materiál LDPE

Z tabulky 8.6 a obrázků 8.9 a 8.10 lze vypožorovat, že ionizační beta záření má značný vliv na povrchovou energii materiálu LDPE. Po ozáření dochází k nárůstu volné povrchové energie a také její polární složky, což má za následek výrazné zlepšení adhezních vlastností materiálu LDPE. Hodnoty volné povrchové energie (γ_s) a její polární (γ_s^p) a disperzní složky (γ_s^d) jsou shrnuty v tabulce 8.6. Výsledky z regresního modelu jsou navíc zobrazeny na následujících obrázcích (Obr. 8.9 a 8.10).

Tab. 8.6: Volná povrchová energie u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

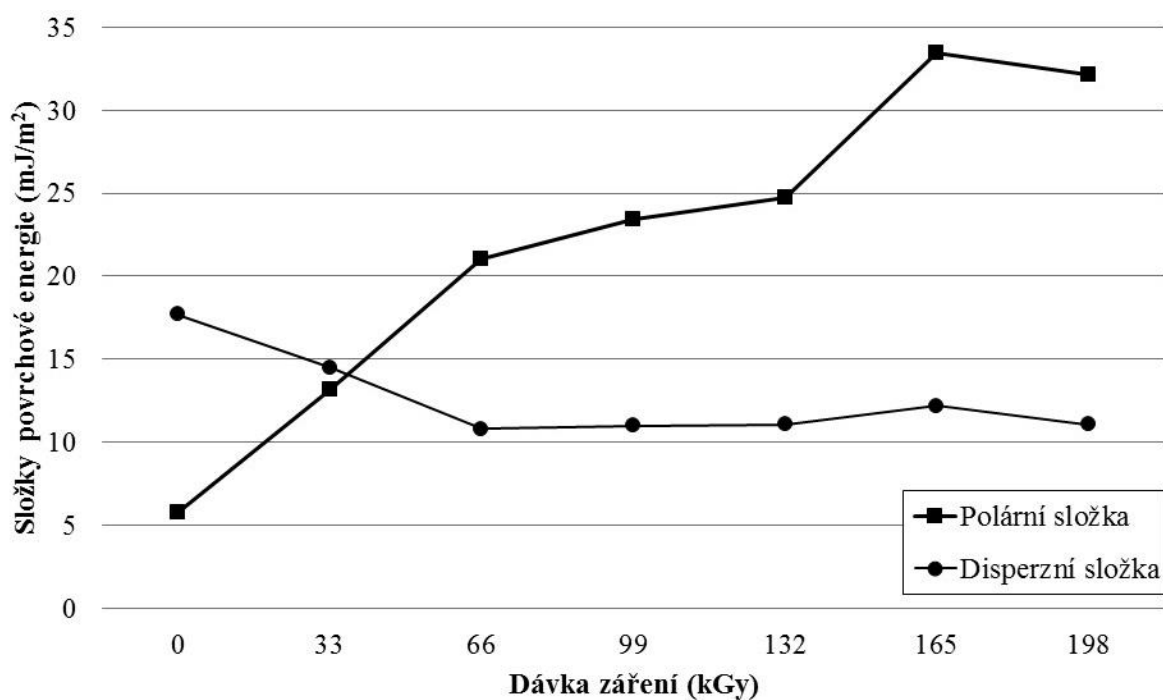
LDPE								
Kapaliny	Povrchová energie a její složky (mJ/m ²)	Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
OWRK model destilovaná voda + glycerin	γ_s	24,1	27,8	31,8	34,6	35,8	45,4	42,9
	γ_s^p	5,5	12,9	20,7	20,6	23,4	29,9	29,1
	γ_s^d	18,6	14,9	11,1	14,0	12,4	15,5	13,8
OWRK model destilovaná voda + etylenglykol	γ_s	23,2	27,6	31,7	34,2	35,7	45,6	43,2
	γ_s^p	6,1	13,3	21,2	24,7	25,3	35,0	33,4
	γ_s^d	17,1	14,3	10,5	9,5	10,4	10,6	9,8
OWRK model - regresní	γ_s	23,5	27,7	31,8	34,4	35,8	45,6	43,2
	γ_s^p	5,8	13,2	21,0	23,4	24,7	33,4	32,1
	γ_s^d	17,7	14,5	10,8	11,0	11,1	12,2	11,1

Z naměřených výsledků (Tab. 8.6, Obr. 8.9) je patrné, že nejnižší hodnoty volné povrchové energie u materiálu LDPE byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 24,1 mJ/m² (pro destilovanou vodu + glycerin), 23,2 mJ/m² (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a 23,5 mJ/m² (pro regresní model). S rostoucí dávkou záření dochází k nárůstu volné povrchové energie. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo taktéž, jako v předchozím případě, ozářením dávkou 165 kGy, díky které vzrostly na 45,4 mJ/m² (pro destilovanou vodu + glycerin), 45,6 mJ/m² (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a na 45,6 mJ/m² (pro regresní model), což je nárůst přibližně o 90 % oproti neošetřenému materiálu.



Obr. 8.9: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

Obdobně jako v předchozím případě má i u materiálu LDPE polární složka podobný trend jako volná povrchová energie. Hodnota polární složky vzrostla dle regresního modelu OWRK z 5,8 mJ/m² (u neošetřeného materiálu) na 33,4 mJ/m² (u materiálu ozářeného dávkou 165 kGy), což je nárůst přibližně o 480 % (Obr. 8.10).



Obr. 8.10: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

Dle naměřených výsledků je možno konstatovat (Tab. 8.5, Obr. 8.7 a 8.8), že ionizační beta záření je efektivní způsob ke zlepšení adhezních vlastností materiálu LDPE, které je charakterizováno výrazným zvýšením volné povrchové energie a její polární složky.

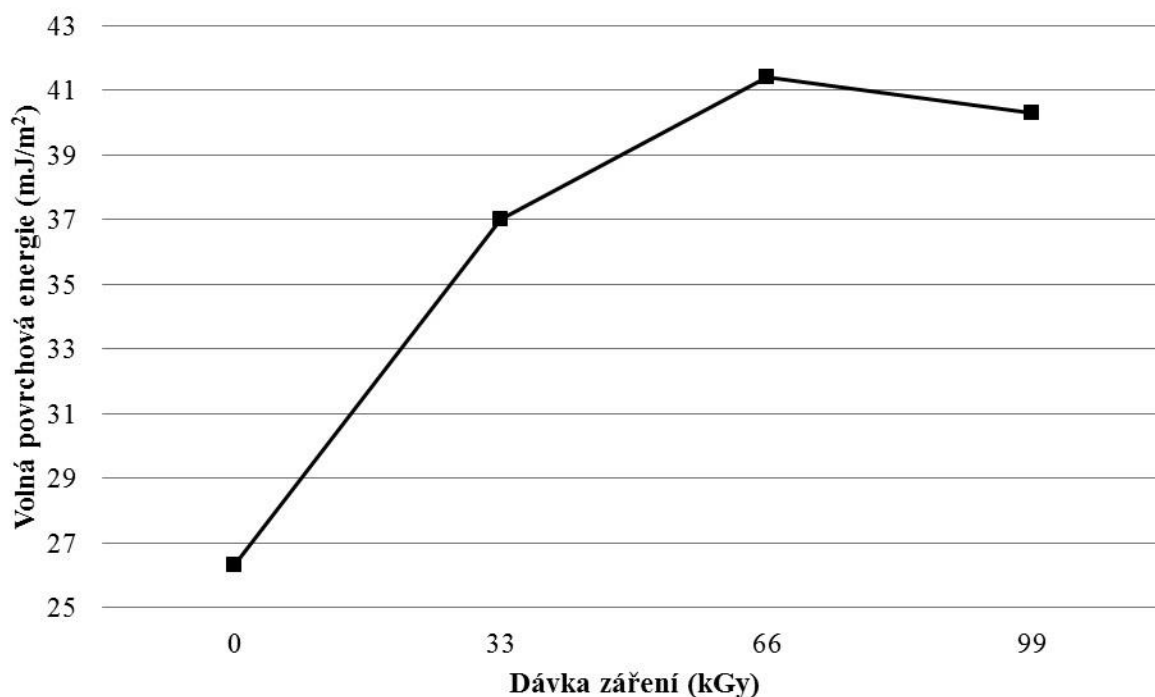
8.2.3 Materiál PP

Z naměřených hodnot u materiálu PP je zřejmé (Tab. 8.7, Obr. 8.11 a 8.12), že obdobně jako v předchozích dvou případech, ionizační beta záření výrazně zvyšuje povrchovou energii a také její polární složku, v důsledku čehož dochází k výraznému zlepšení adhezních vlastností. V tabulce 8.7 lze vidět hodnoty volné povrchové energie (γ_s) a její polární (γ_s^p) a disperzní složky (γ_s^d). Z hodnot regresního modelu jsou pak následně sestrojeny grafy (Obr. 8.11 a 8.12).

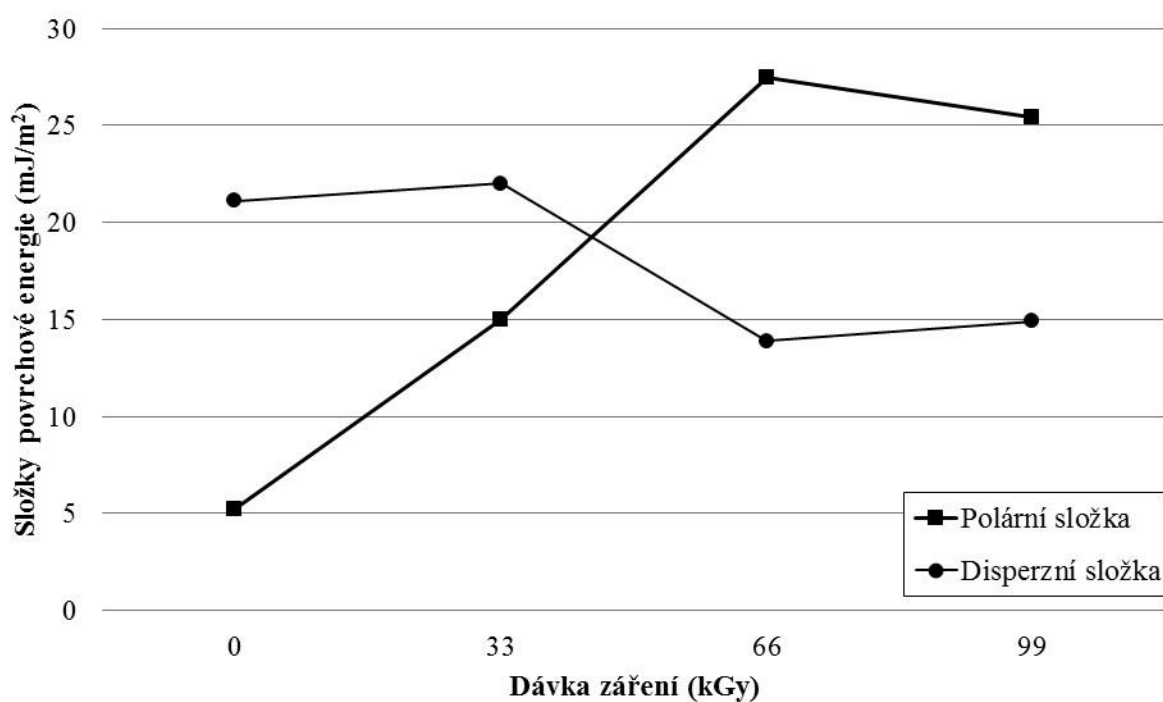
Tab. 8.7: Volná povrchová energie u materiálu PP v závislosti na dávce záření.

PP					
Kapaliny	Povrchová energie a její složky (mJ/m^2)	Dávky záření (kGy)			
		0	33	66	99
OWRK model destilovaná voda + glycerin	γ_s	26,7	37,5	41,4	40,2
	γ_s^p	5,0	14,3	29,3	27,0
	γ_s^d	21,7	23,2	12,1	13,2
OWRK model destilovaná voda + etylenglykol	γ_s	26,1	36,6	41,6	40,6
	γ_s^p	5,2	15,3	26,8	24,7
	γ_s^d	20,9	21,3	14,8	15,9
OWRK model – regresní	γ_s	26,3	37,0	41,4	40,3
	γ_s^p	5,2	15,0	27,5	25,4
	γ_s^d	21,1	22,0	13,9	14,9

Výsledky měření ukazují, že nejnižší hodnoty volné povrchové energie u materiálu PP byly naměřeny u neošetřeného povrchu (dávka záření 0 kGy) a to 26,7 mJ/m^2 (pro destilovanou vodu + glycerin), 26,1 mJ/m^2 (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a 26,3 mJ/m^2 (pro regresní model). S rostoucí dávkou záření dochází k nárůstu volné povrchové energie. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo ozářením dávkou 66 kGy, díky které vzrostly na 41,4 mJ/m^2 (pro destilovanou vodu + glycerin), 41,6 mJ/m^2 (pro destilovanou vodu + etylenglykol) a na 41,4 mJ/m^2 (pro regresní model), což je nárůst přibližně o 60 % oproti neošetřenému materiálu.



Obr. 8.11: Trendová křivka volné povrchové energie materiálu PP v závislosti na dávce záření.



Obr. 8.12: Trendové křivky jednotlivých složek volné povrchové energie materiálu PP v závislosti na dávce záření.

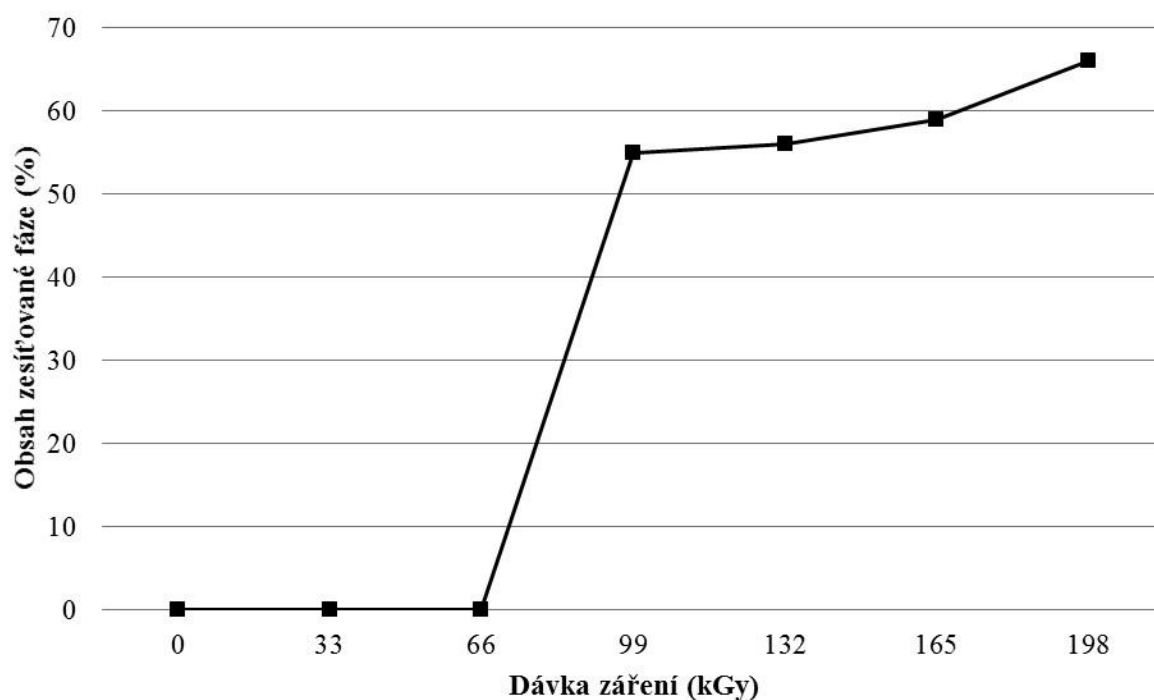
Z trendové křivky polární složky (Obr. 8.12) lze vypočítat obdobný trend jako v případě volné povrchové energie (Obr. 8.11). Hodnota polární složky vzrostla dle regresního modelu OWRK z $5,2 \text{ mJ/m}^2$ (u neošetřeného materiálu) na $27,5 \text{ mJ/m}^2$ (u materiálu ozářeného dávkou 66 kGy), což je nárůst přibližně o 430 %.

Z naměřených výsledků (Tab. 8.7, Obr. 8.11 a 8.12) se ošetření ionizačním beta zářením jeví jako efektivní způsob ke zlepšení adhezních vlastností materiálu PP, které je charakterizováno výrazným zvýšením volné povrchové energie a její polární složky.

8.3 Stanovení obsahu zesíťované fáze (gelu)

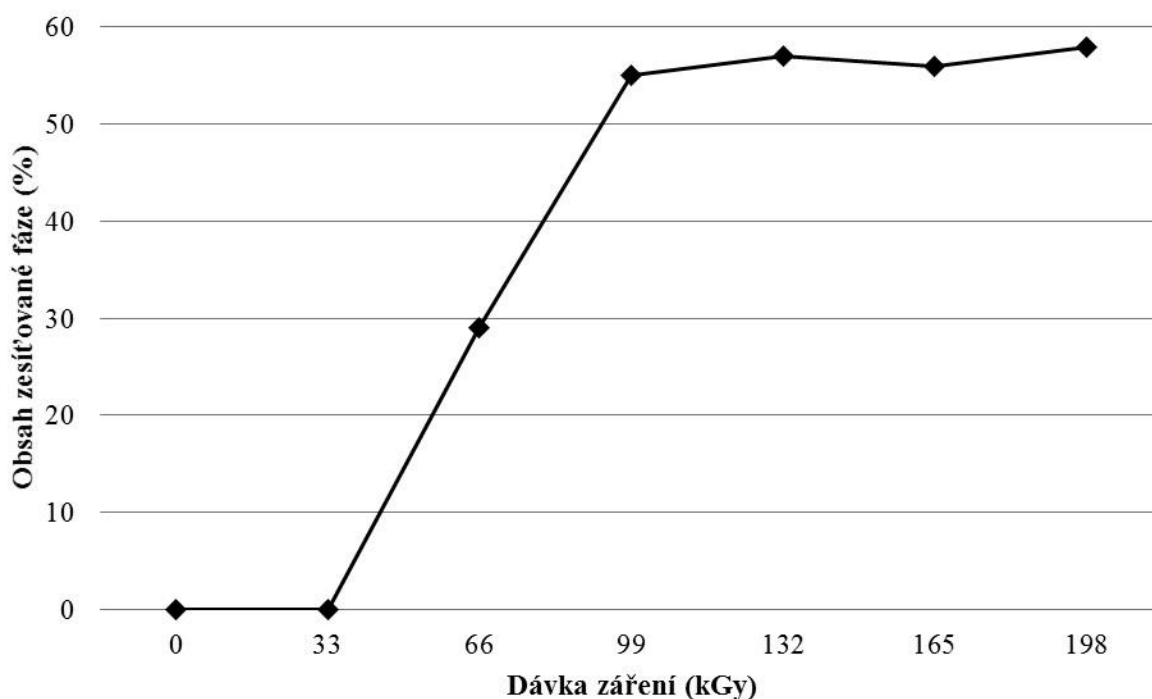
Pro stanovení obsahu zesíťované fáze (gelu) bylo využito gelové zkoušky dle normy EN ISO 579. Závislost obsahu zesíťované fáze na absorbované dávce záření znázorňují trendové křivky v obrázcích 8.13 (pro materiál HDPE), 8.14 (pro materiál LDPE) a 8.15 (pro materiál PP).

Jak je patrné z naměřených výsledků, tak tvorba gelu je závislá na hodnotách dávek záření. Z přechozích studií [57] je známo, že k síťování dochází převážně v amorfnní oblasti. Z toho lze usuzovat, že se zvyšujícím se obsahem zesíťované fáze (gelu) roste i část strukturální sítě vytvořené převážně v amorfnní oblasti polymeru v důsledku ozařování.

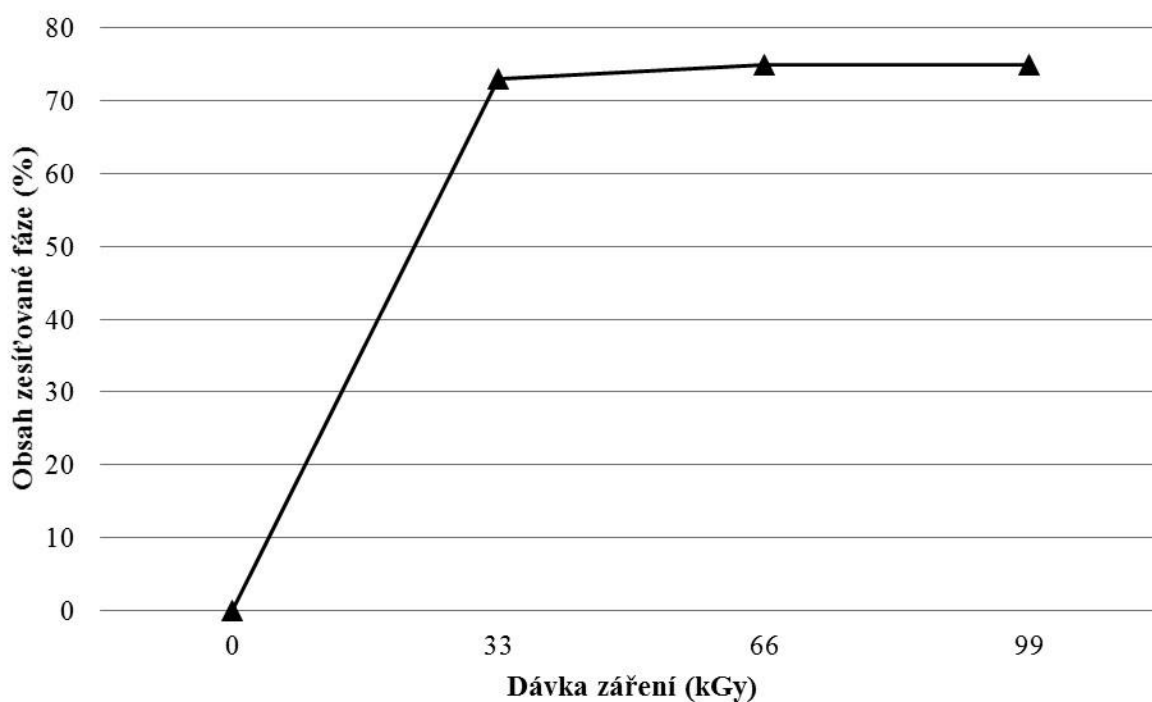


Obr. 8.13: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu HDPE (trendová křivka).

U materiálů HDPE a LDPE (Obr. 8.13 a 8.14) byl naměřen nejvyšší obsah zesíťované fáze (gelu) u zkušebních těles ozářených dávkou 198 kGy. Do dávky 66 kGy (v případě HDPE) a do dávky 33 kGy (v případě LDPE) nebyl zjištěn žádný měřitelný obsah gelu. Toto zjištění je ovšem v rozporu s ostatními měřenými vlastnostmi, u kterých byly zaznamenány změny již při nejnižších dávkách záření. To si lze do jisté míry vysvětlit tím, že vzniklé mikrogely mohly projít filtračním sítem a tudíž nebyly započítány do celkového obsahu zesíťované fáze. Tento jev by bylo možné částečně eliminovat použitím síta s vyšší jemností, které by zachytilo i vzniklé mikrogely.



Obr. 8.14: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu LDPE (trendová křivka).



Obr. 8.15: Obsah zesíťované fáze (gelu) u materiálu PP (trendová křivka)

Vliv absorbované dávky záření na obsah zesíťované fáze u materiálu PP lze vidět na obrázku 8.15. Jak je patrné z výsledků měření, tak již při nejnižší dávce (33 kGy) dochází k enormnímu nárůstu obsahu gelu. Při vyšších dávkách záření (66 a 99 kGy) se obsah gelové fáze u materiálu PP mění jen minimálně (nárůst obsahu gelu při dávkách 66 a 99 kGy je pouze 3% v porovnání s dávkou 33 kGy).

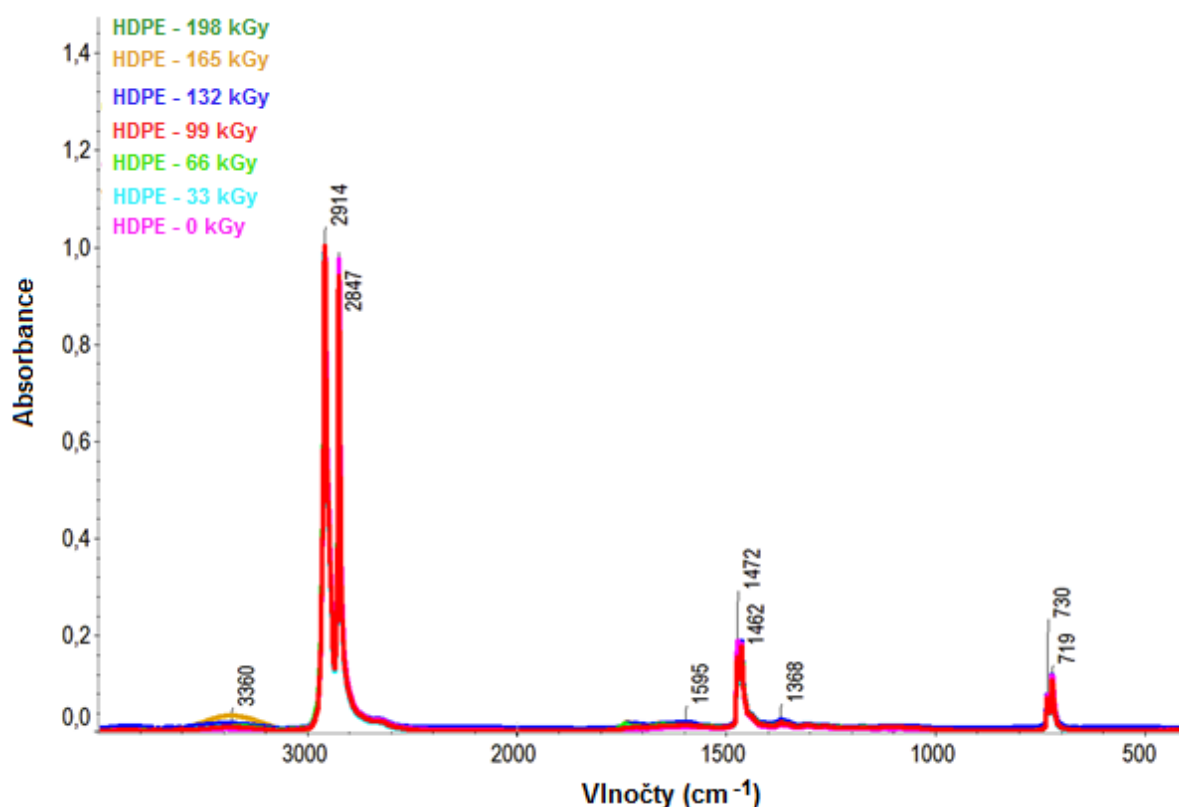
8.4 Relativní zastoupení funkčních skupin (hydroxylových a karbonylových)

Jak je známo z předchozích studií [15, 24, 26, 27] a literatury [5, 8, 12], aby bylo možno lepit nepolární polymery (HDPE, LDPE, PP, aj.), je nutné povrchy těchto materiálů vhodným způsobem modifikovat a zajistit, aby se na nich vyskytovaly mimo jiné i reakce schopné funkční skupiny (karbonylové, hydroxylové aj.).

Pro určení relativního zastoupení hydroxylových a karbonylových skupin bylo využito infračervené spektrometrie. Infračervená spektra byla měřena ATR technikou (technika zeslabeného úplného odrazu) a bylo využito FTIR spektrometru Nicolet 6700 FTIR profukovaného suchým vzduchem. Spektra byla měřena při rozlišení 2 cm^{-1} za použití 64 akumulací spektra. Jako pozadí sloužil čistý ATR diamantový krystal. Manipulace se spektry byla provedena programem OMNIC Software 8.2 a pro jejich úpravu bylo využito ATR korekce. Každý vzorek byl měřen 3krát na každé jeho straně. Pro stanovení ploch pásů bylo použito průměrné spektrum z šesti naměřených spekter. Před průměrováním byla spektra upravena automaticky na základní linii a normalizována.

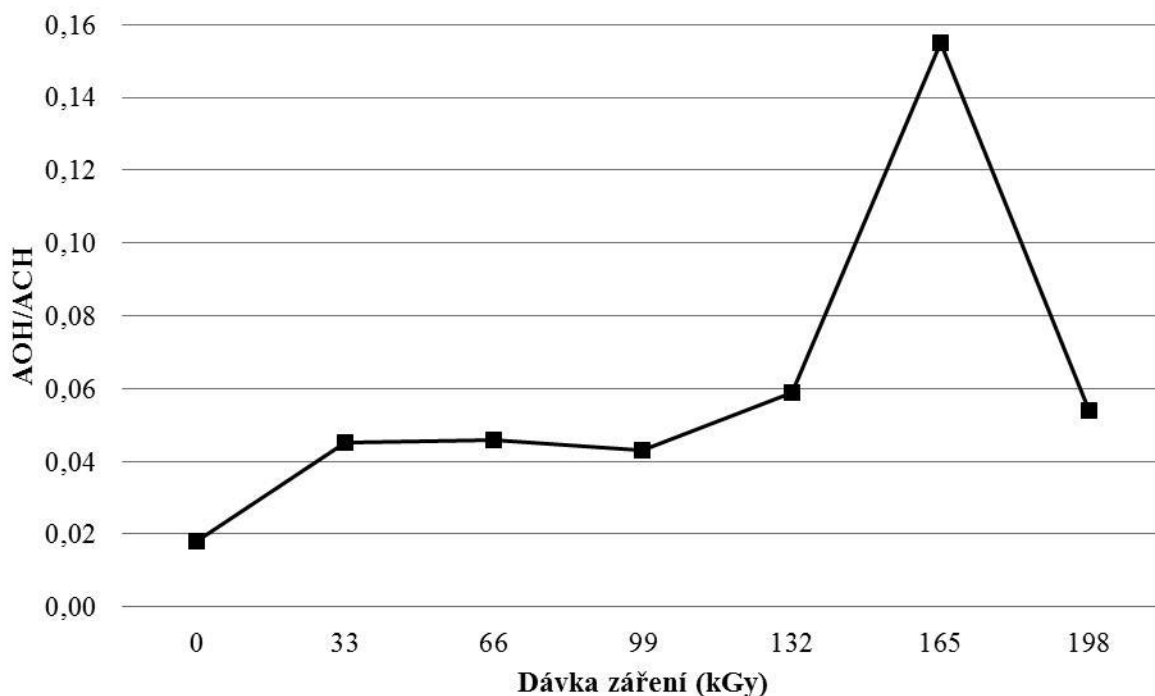
8.4.1 Materiál HDPE

Při porovnání ozářených a neozářených těles z materiálu HDPE (Obr. 8.16, 8.17 a 8.18) je možno konstatovat, že v důsledku ozáření dochází k jeho oxidaci na C-H vazbách za vzniku kyslíkatých funkčních skupin.

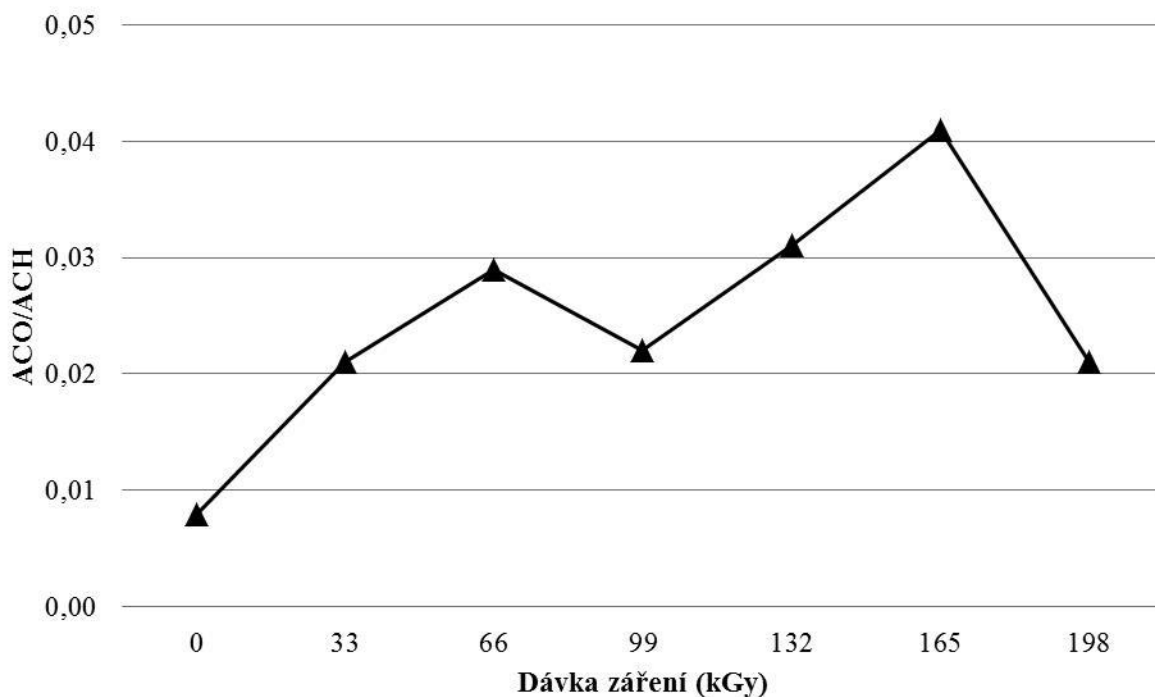


Obr. 8.16: Infračervená spektrometrie pro materiál HDPE a jednotlivé dávky záření.

Ze spekter je patrný pokles intenzit pásů alifatických C-H vazeb (záporné pásy při 3000 – 2800, ~1450 a ~1370 cm^{-1}) a nárůst intenzit pásů kyslíkatých funkčních skupin při 1595 a 3360 cm^{-1} . Naměřené výsledky ukazují, že při ozařování HDPE dochází k oxidaci na C-H vazbách za vzniku karbonylových a hydroxylových skupin (Obr. 8.16).



Obr. 8.17: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka).

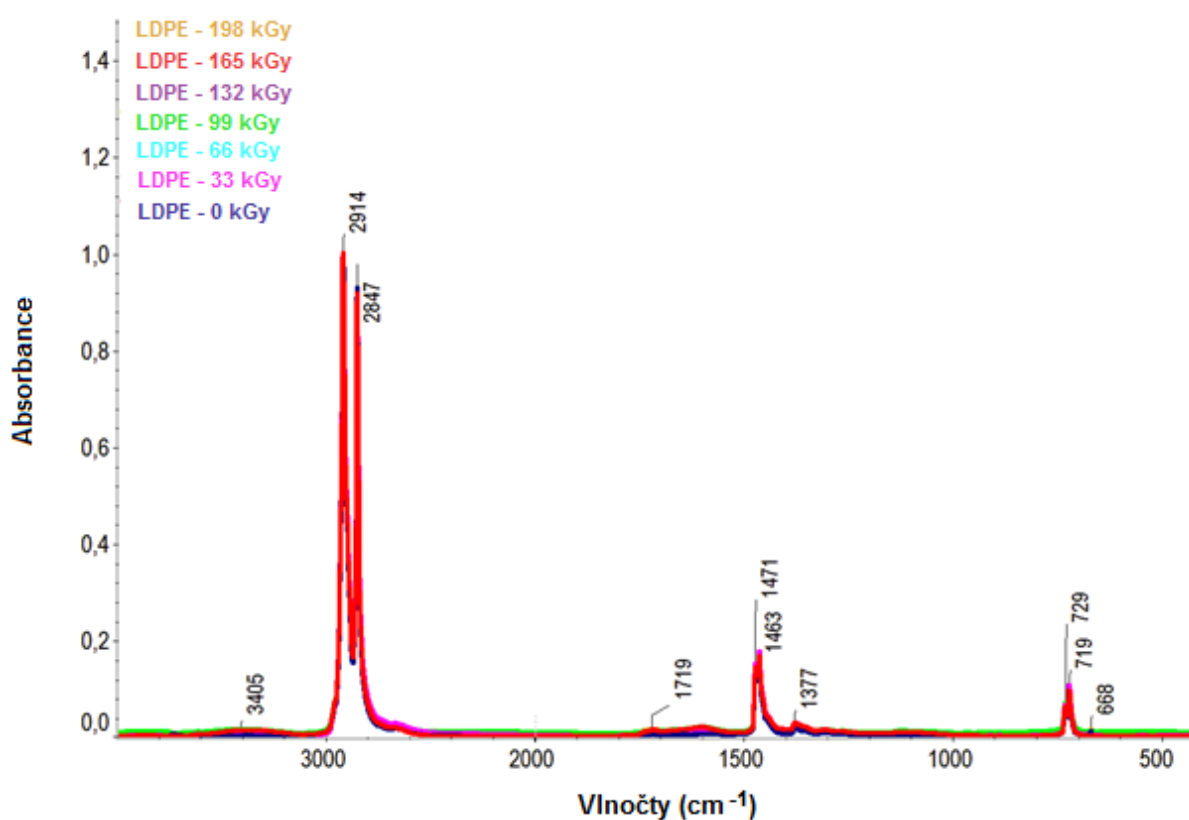


Obr. 8.18: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka).

Relativní zastoupení hydroxylových a karbonylových funkčních skupin jsou znázorněny trendovými křivkami na obrázcích 8.17 a 8.18. Z naměřených výsledků je patrné, že jejich zastoupení je závislé na absorbované dávce záření. Nejnížší relativní zastoupení jak hydroxylových, tak karbonylových skupin bylo zaznamenáno u nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy). Se zvyšující se dávkou záření zastoupení kyslíkatých funkčních skupin roste a nejvyšší relativní zastoupení bylo zaznamenáno u dávky 165 kGy.

8.4.2 Materiál LDPE

Z naměřených výsledků u materiálu LDPE je patrné (Obr. 8.19, 8.20 a 8.21), že obdobně jako v přechodím případě, dochází k jeho oxidaci na C-H vazbách za vzniku kyslíkatých funkčních skupin v důsledku ozařování.

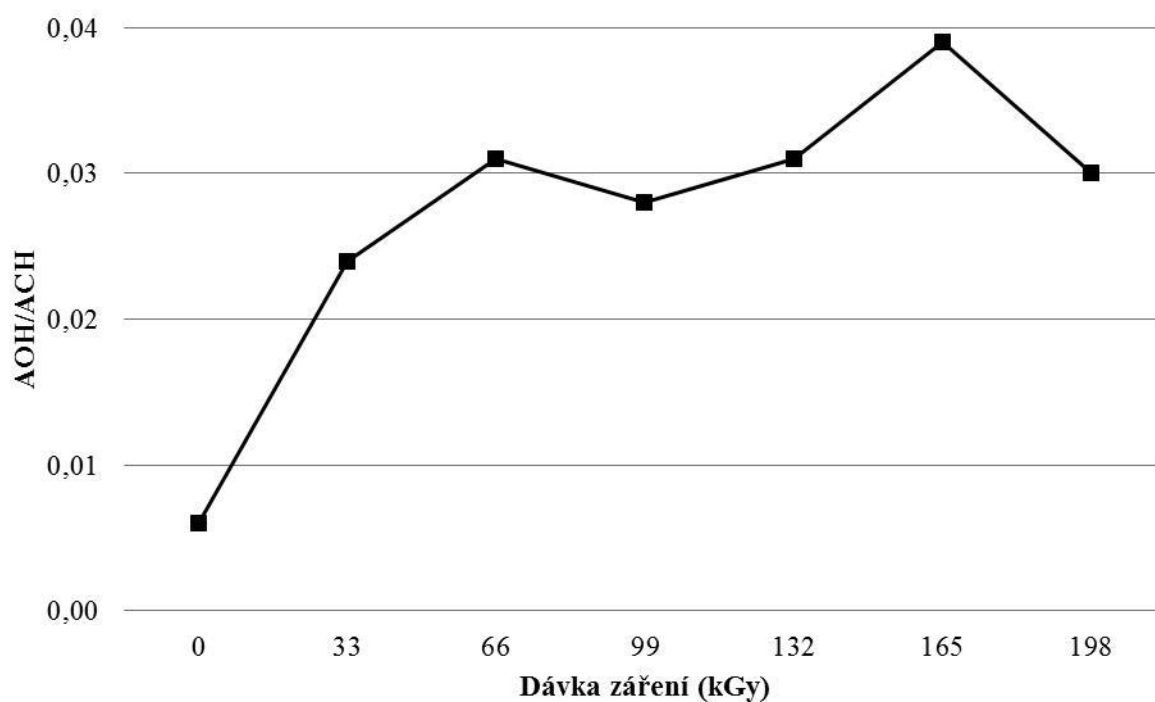


Obr. 8.19: Infračervená spektrometrie pro materiál LDPE a jednotlivé dávky záření.

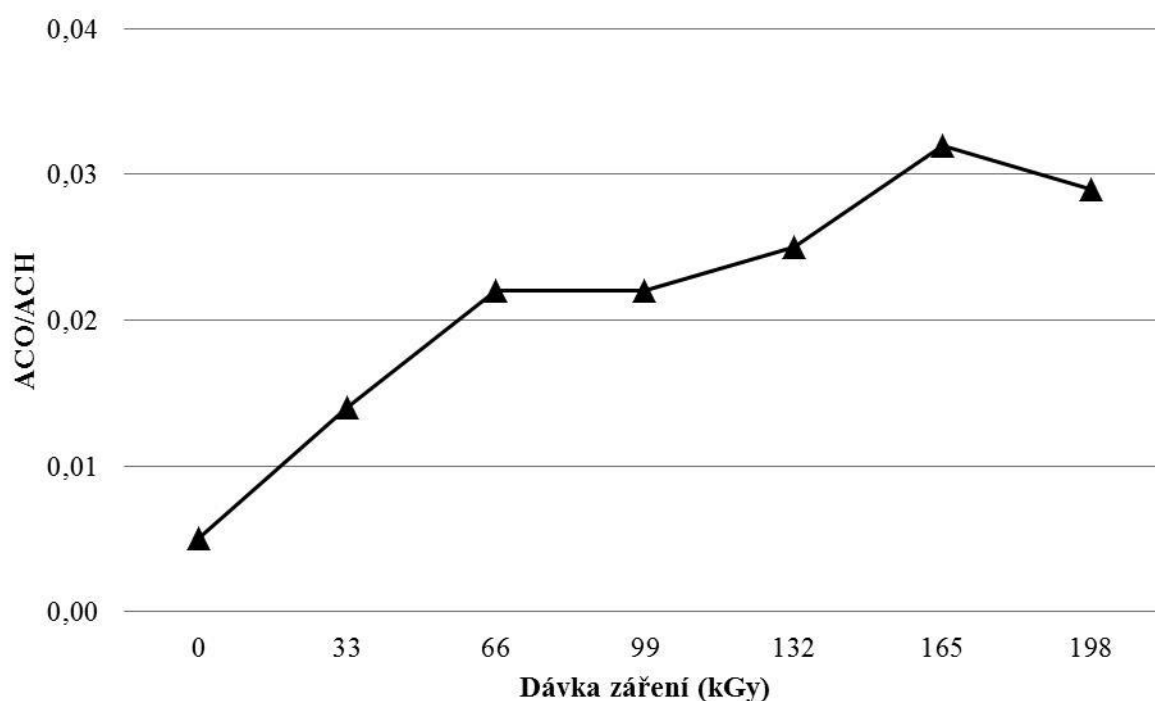
Ze spekter je patrný pokles intenzit pásů alifatických C-H vazeb a nárůst intenzit pásů kyslíkatých funkčních skupin při 1719 a 3405 cm⁻¹. Z výsledků měření lze konstatovat, že při ozařování materiálu LDPE dochází k oxidaci na C-H vazbách za vzniku karbonylových a hydroxylových skupin (Obr. 8.19).

Relativní zastoupení hydroxylových a karbonylových funkčních skupin jsou znázorněny trendovými křivkami na obrázcích 8.20 a 8.21. Z naměřených výsledků je patrné, že zastoupení kyslíkatých funkčních skupin je závislé na absorbované dávce záření. Nejnížší relativní zastoupení jak hydroxylových, tak karbonylových skupin bylo zaznamenáno u nemodifikovaného materiálu (dávka záření

0 kGy). Se zvyšující se dávkou záření zastoupení kyslíkatých funkčních skupin roste a nejvyšší relativní zastoupení bylo zaznamenáno u dávky 165 kGy.



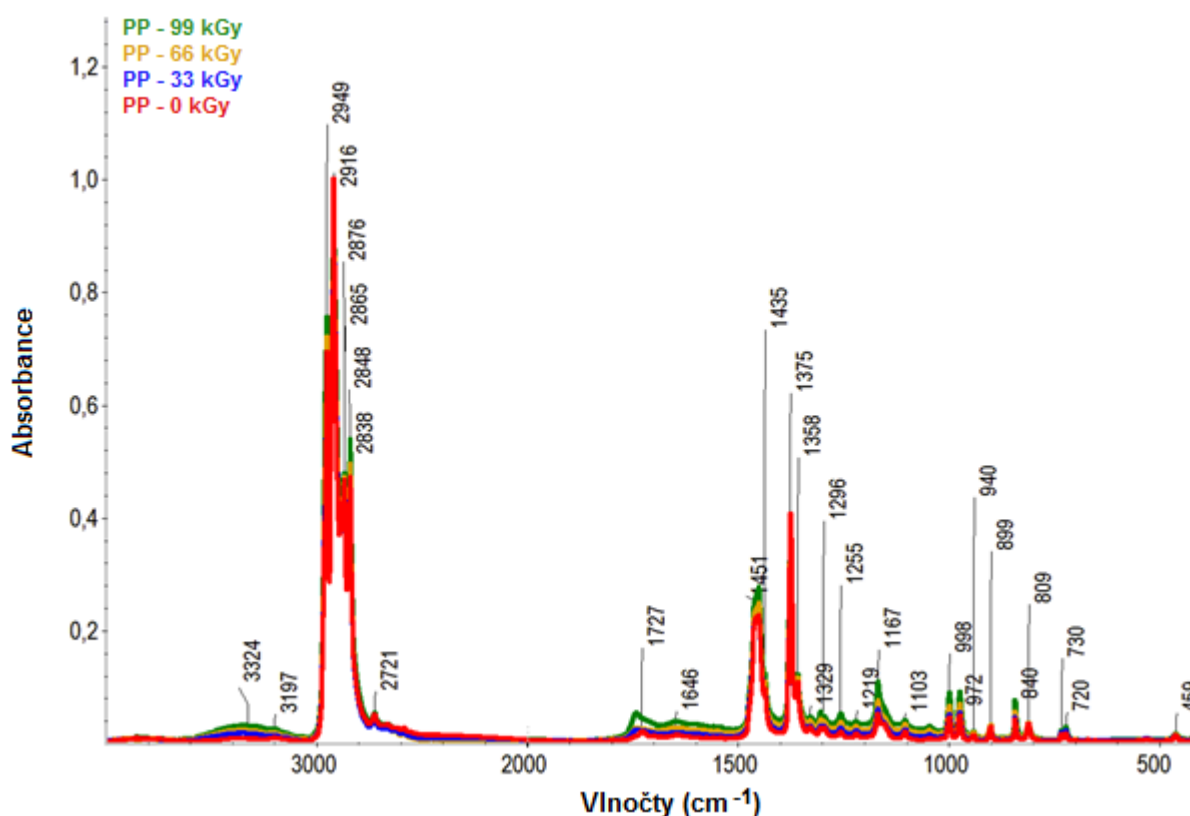
Obr. 8.20: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka).



Obr. 8.21: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření (trendová křivka).

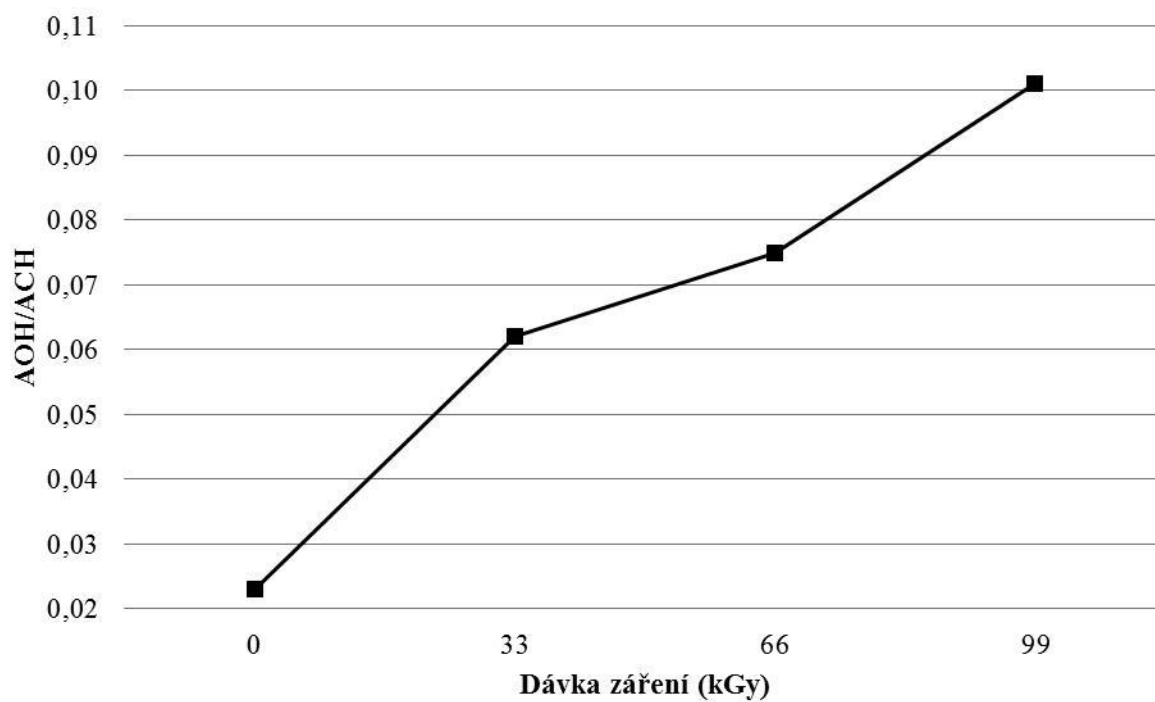
8.4.3 Materiál PP

Na obrázku 8.22 lze vidět vliv ionizačního beta záření na zastoupení kyslíkatých funkčních skupin u materiálu PP. Ze spekter je patrné, že během ozařování materiálu PP dochází k jeho oxidaci za vzniku hydroxylových (oblast spektra $3600 - 3000 \text{ cm}^{-1}$) a karbonylových (oblast spektra $1800 - 1500 \text{ cm}^{-1}$) skupin.

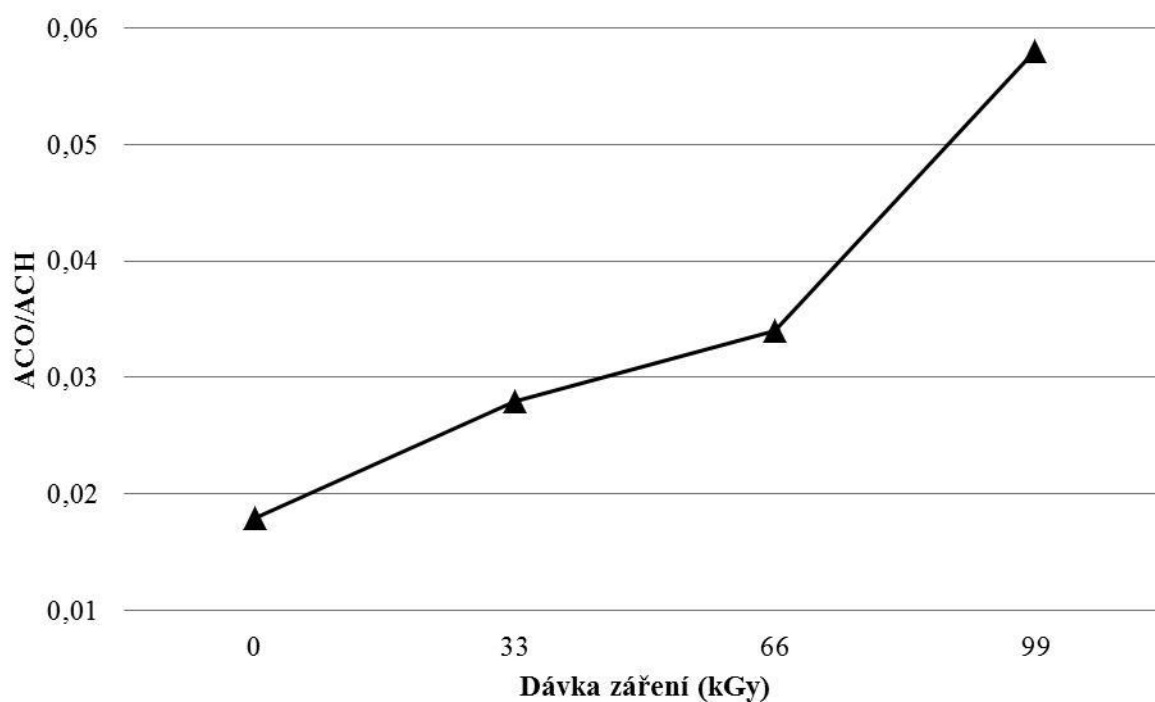


Obr. 8.22: Infračervená spektrometrie pro materiál PP a jednotlivé dávky záření.

Na obrázcích 8.23 a 8.24 je prostřednictvím trendových křivek zobrazeno relativní zastoupení hydroxylových a karbonylových funkčních skupin. Při porovnání ozářených a neozářených těles lze konstatovat, že zastoupení kyslíkatých funkčních skupin roste se zvyšující se dávkou záření. Nejnižší relativní zastoupení jak hydroxylových, tak karbonylových skupin bylo zaznamenáno u nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) a nejvyšší u materiálu, který byl modifikován dávkou 99 kGy.



Obr. 8.23: Relativní zastoupení hydroxylových funkčních skupin u materiálu PP v závislosti na dávce záření (trendová křivka).



Obr. 8.24: Relativní zastoupení karbonylových funkčních skupin u materiálu PP v závislosti na dávce záření (trendová křivka).

8.5 Pevnost lepených spojů

Pro aplikace lepení je nejdůležitějším údajem únosnost lepeného spoje. K jeho posouzení byla měřena maximální zatěžující síla, kterou definovaný lepený spoj přenáší. Pro její zjištění bylo využito tahové zkoušky, která byla realizována na trhacím stroji Zwick 1456 při rychlosti příčnicku 50 mm/min. Měření bylo uskutečněno při pokojové teploty (23 °C) s opakovatelností minimálně 10 (pro každý materiál a každé lepidlo) a následně byla získaná data vyhodnocena pomocí softwaru Test Expert. Pro grafickou prezentaci výsledků bylo využito sloupcových grafů aritmetického průměru (Rov. 8.1) s vyznačenou příslušnou chybou měření prezentovanou střední chybou průměru (Rov. 8.2).

8.5.1 Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 1008

Z naměřených výsledků je zřejmé (Tab. 8.8, Obr. 8.25, 8.26 a 8.27), že po ošetření povrchů zkoumaných materiálů (HDPE, LDPE, PP) ionizačním beta zářením dochází k výraznému nárůstu pevnosti lepených spojů, pro jejichž konstrukci bylo využito kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 1008.

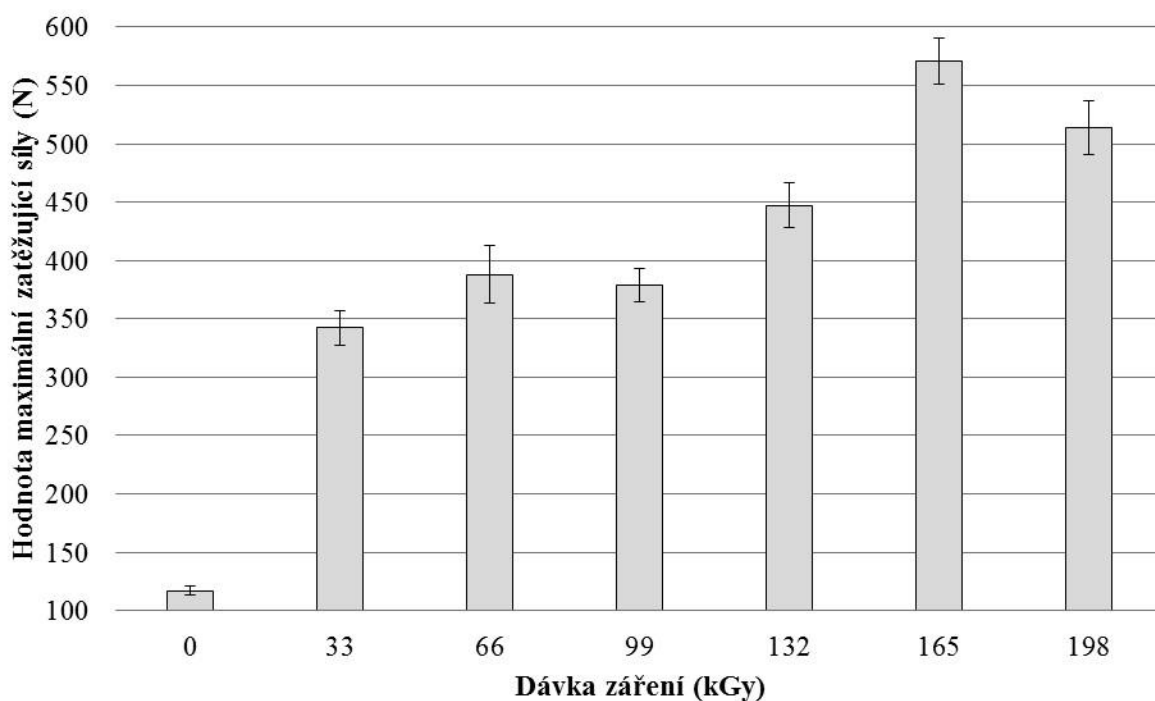
Tab. 8.8: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 1008.

Kyanoakrylátové lepidlo Cyberbond 1008								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	117,2	342,3	388,1	378,9	447,3	571,1	513,9
	s_x (N)	3,6	14,8	25,0	14,2	19,3	19,7	23,2
LDPE	\bar{x} (N)	114,3	233,1	250,7	242,2	256,2	330,6	307,0
	s_x (N)	6,7	10,0	8,1	9,5	12,3	10,9	12,5
PP	\bar{x} (N)	195,1	352,0	494,7	450,5			
	s_x (N)	7,1	21,4	16,6	16,7			

Materiál HDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozařeného materiálu HDPE je zřejmé (Tab. 8.8 a Obr. 8.25), že pevnost spoje roste se zvyšující se dávkou záření. Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při nejnižší dávce, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 192 %. Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví 165 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla přibližně o 387 % vůči neošetřenému materiálu.

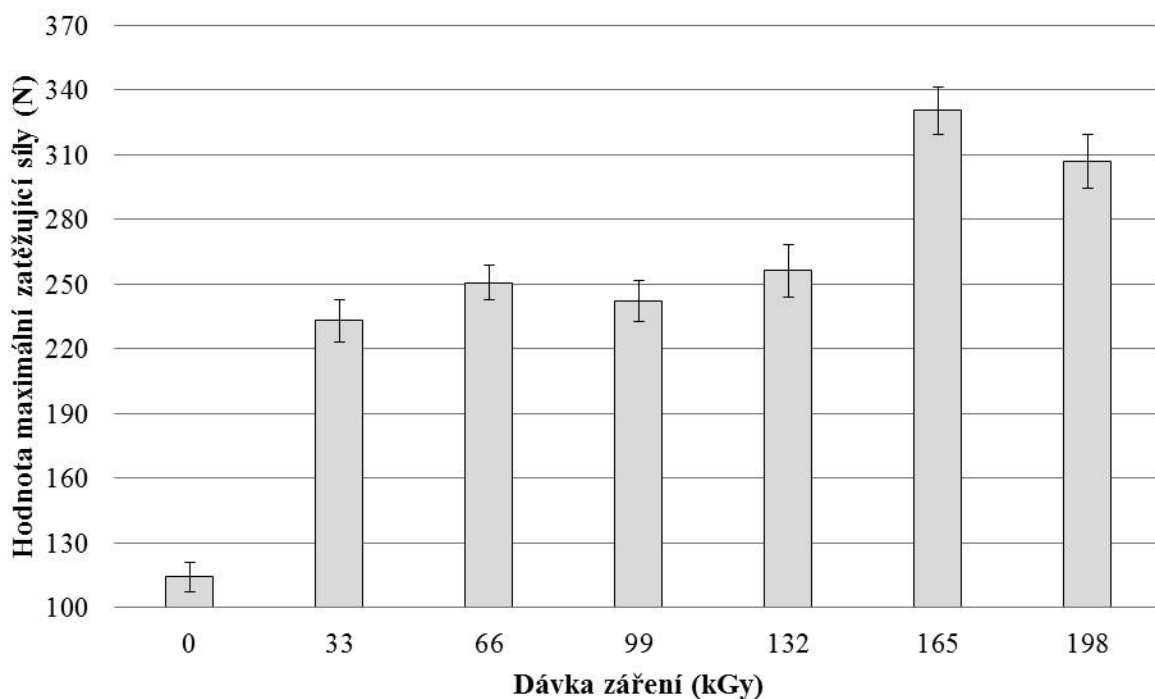
Dávka záření 198 kGy již nemá tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.8 a Obr. 8.25), naopak dochází u ní dokonce k mírnému poklesu (přibližně o 10 % v porovnání s dávkou 165 kGy).



Obr. 8.25: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

Z výsledku měření u materiálu LDPE lze konstatovat, že v důsledku ozáření došlo k nárůstu pevnosti lepených spojů. (Tab. 8.8 a Obr. 8.26).



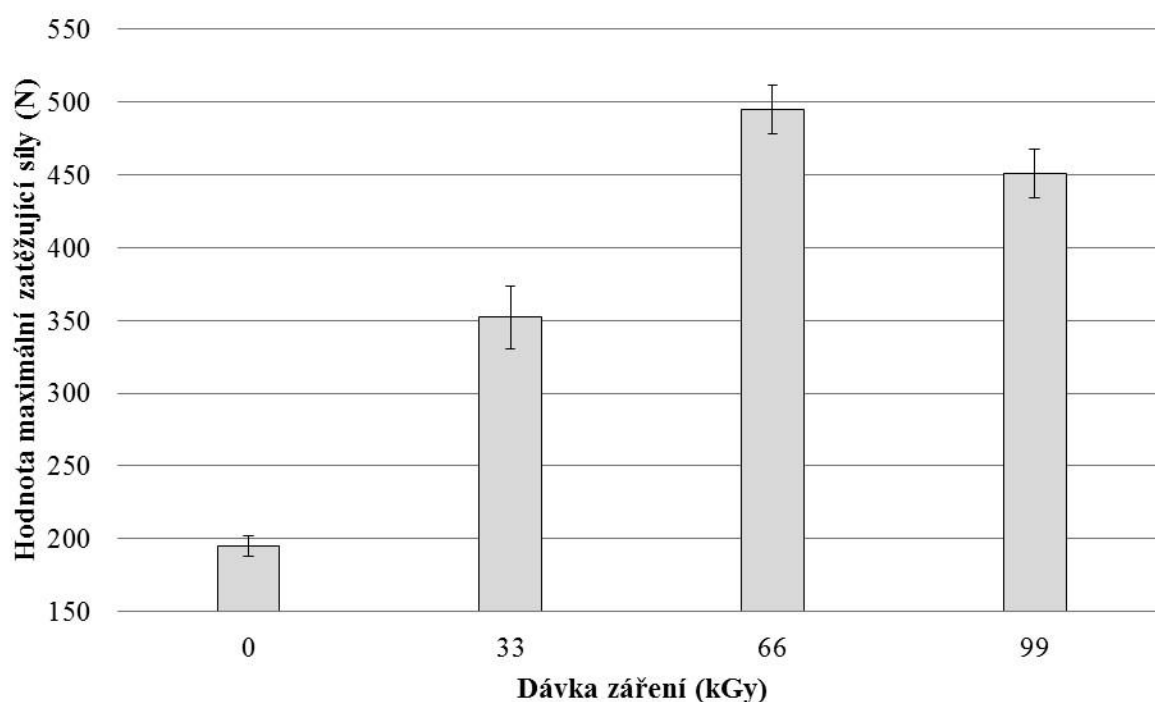
Obr. 8.26: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření.

Výrazný nárůst pevnosti byl zaznamenán již při dávce 33 kGy, kdy pevnost vzrostla přibližně o 104 %. V rozmezí dávek 33 až 132 kGy byla zaznamenána jen nepatrná změna (v řádu několika procent). Obdobně jako v předchozím případě se i u materiálu LDPE jeví jako nejvhodnější dávka záření (s ohledem na únosnost spoje) 165 kGy, kdy u takto modifikovaných materiálů se pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, zvýšila o 189 % vůči neošetřenému materiálu.

U dávky záření 198 kGy (obdobně jako v předchozím případě) došlo k mírnému poklesu únosnosti spoje (Tab. 8.8 a Obr. 8.26), přibližně o 7 % v porovnání s dávkou 165 kGy.

Materiál PP

Obrázek 8.27 prezentuje výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření. V tomto případě byl zaznamenán dramatický nárůst pevnosti již při dávce 33 kGy, nicméně nejvyšší pevnosti bylo dosaženo ozáření dávkou 66 kGy (Tab. 8.8 a Obr. 8.27). Pevnost lepených spojů po ozáření vzrostla o 154 % v porovnání s nemodifikovaným materiálem. Dávka 99 kGy již nemá tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje, naopak dochází k jejímu mírnému poklesu (přibližně o 9 %).



Obr. 8.27: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 1008, v závislosti na dávce záření.

8.5.2 Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008

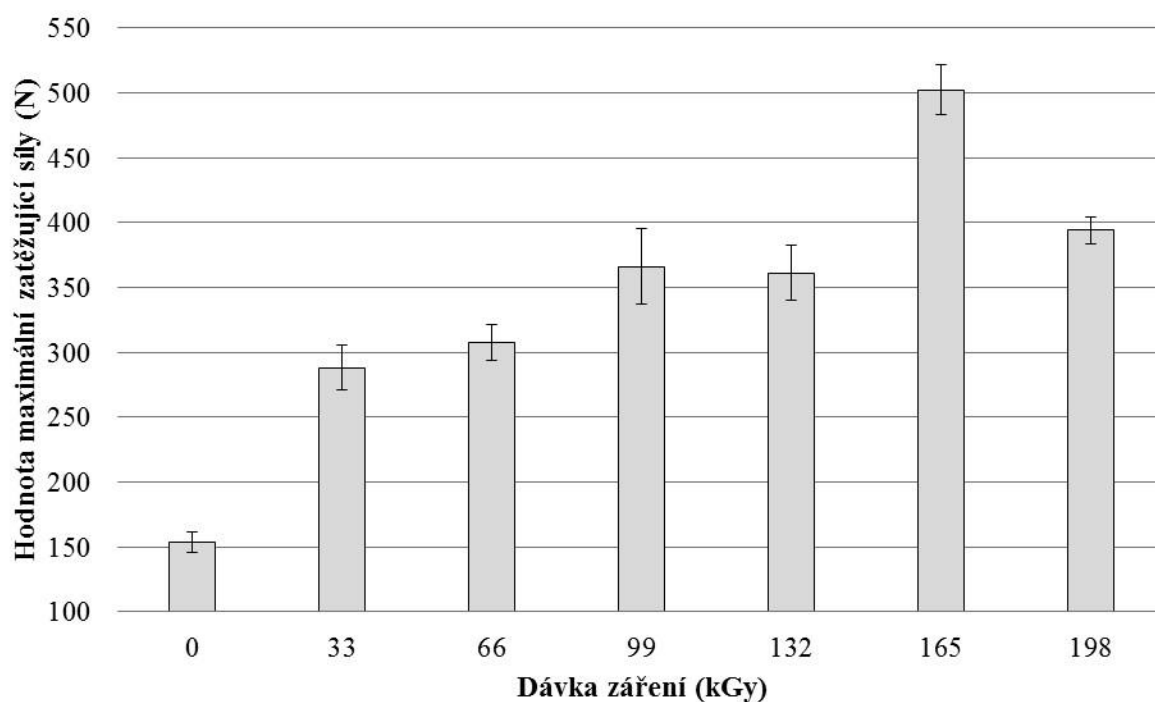
Výsledky měření ukazují (Tab. 8.9, Obr. 8.28, 8.29 a 8.30), že ionizační beta záření zvyšuje pevnost lepených spojů u materiálů HDPE, LDPE a PP za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008.

Tab. 8.9: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008.

Kyanoakrylátové lepidlo Cyberbond 2008								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	153,7	287,9	307,3	366,2	361,3	502,2	394,0
	s_x (N)	8,0	17,3	13,9	28,8	21,7	19,2	10,3
LDPE	\bar{x} (N)	111,8	168,0	220,1	320,0	322,0	372,2	375,6
	s_x (N)	4,7	4,6	13,7	14,7	15,0	19,4	14,2
PP	\bar{x} (N)	374,7	910,8	857,4	810,5			
	s_x (N)	20,2	32,1	26,4	38,1			

Materiál HDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozářeného materiálu HDPE je zřejmé (Tab. 8.9 a Obr. 8.28), že pevnost spoje roste se zvyšující se dávkou záření.



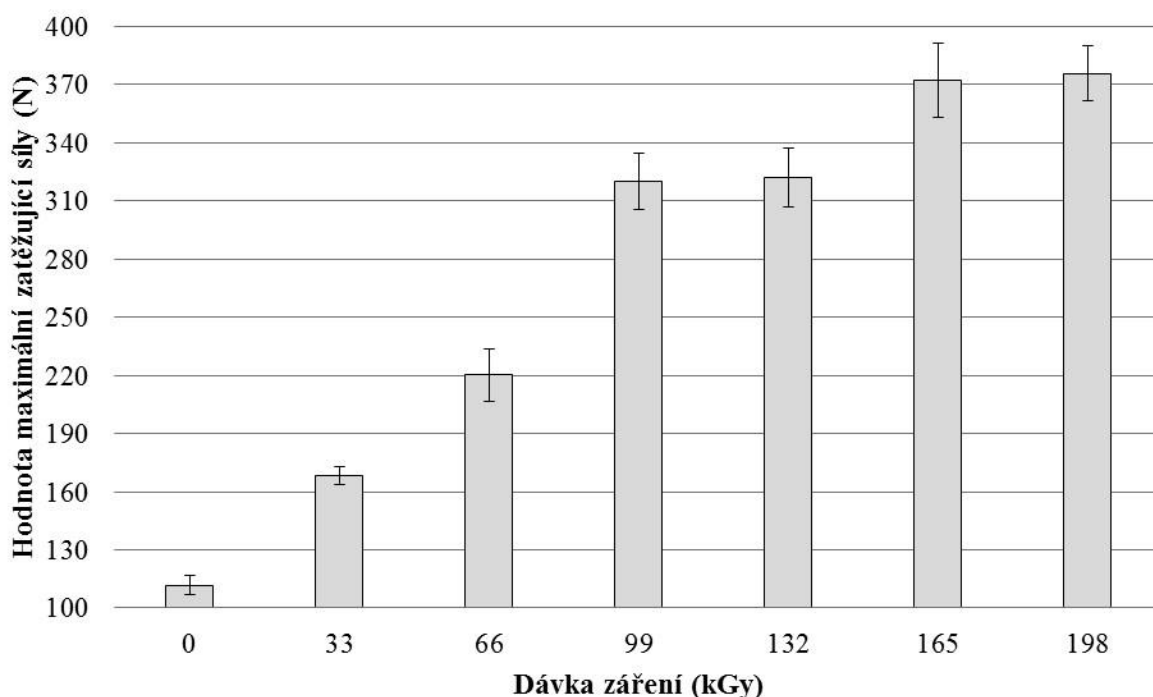
Obr. 8.28: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření.

Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při dávce záření 33 kGy, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 87 %. Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví 165 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla o 227 % vůči neošetřenému materiálu.

Dávka záření 198 kGy již nemá tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.9 a Obr. 8.28), naopak dochází u ní dokonce k poklesu (přibližně o 22 % v porovnání s dávkou 165 kGy).

Materiál LDPE

Z výsledku měření u materiálu LDPE lze konstatovat, že se zvyšující dávkou záření roste i pevnost lepených spojů (Tab. 8.9 a Obr. 8.29). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 50 %, nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při ozáření dávkami 165 a 198 kGy, u kterých byl zaznamenán nárůst o přibližně 235 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem. Jako nejvhodnější dávka se proto v tomto případě jeví 165 kGy, jelikož společně s dávkou 198 kGy poskytuje nejvyšší pevnost spoje, ale v porovnání s ní jsou náklady na ozáření nižší.

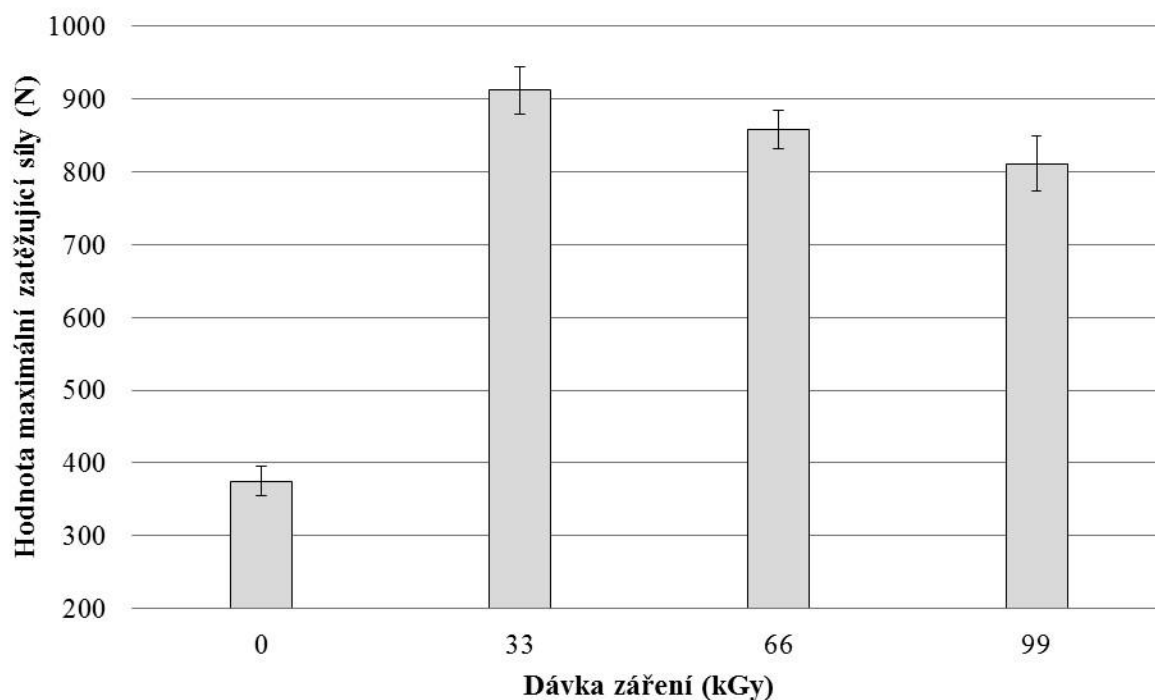


Obr. 8.29: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.30) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření. Při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2008 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 33 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která

charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 374,7 N na 910,8 N, což je nárůst o 143 %. U dávek záření 66 a 99 kGy došlo k poklesu pevností a z tohoto důvodu se jako nejvhodnější jeví dávka 33 kGy.



Obr. 8.30: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 2008, v závislosti na dávce záření.

8.5.3 Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028

Z naměřených výsledků je zřejmé (Tab. 8.10, Obr. 8.31, 8.32 a 8.33), že po ošetření povrchů zkoumaných materiálů (HDPE, LDPE, PP) ionizačním beta zářením dochází k výraznému nárůstu pevnosti lepených spojů, pro jejichž konstrukci bylo využito kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028.

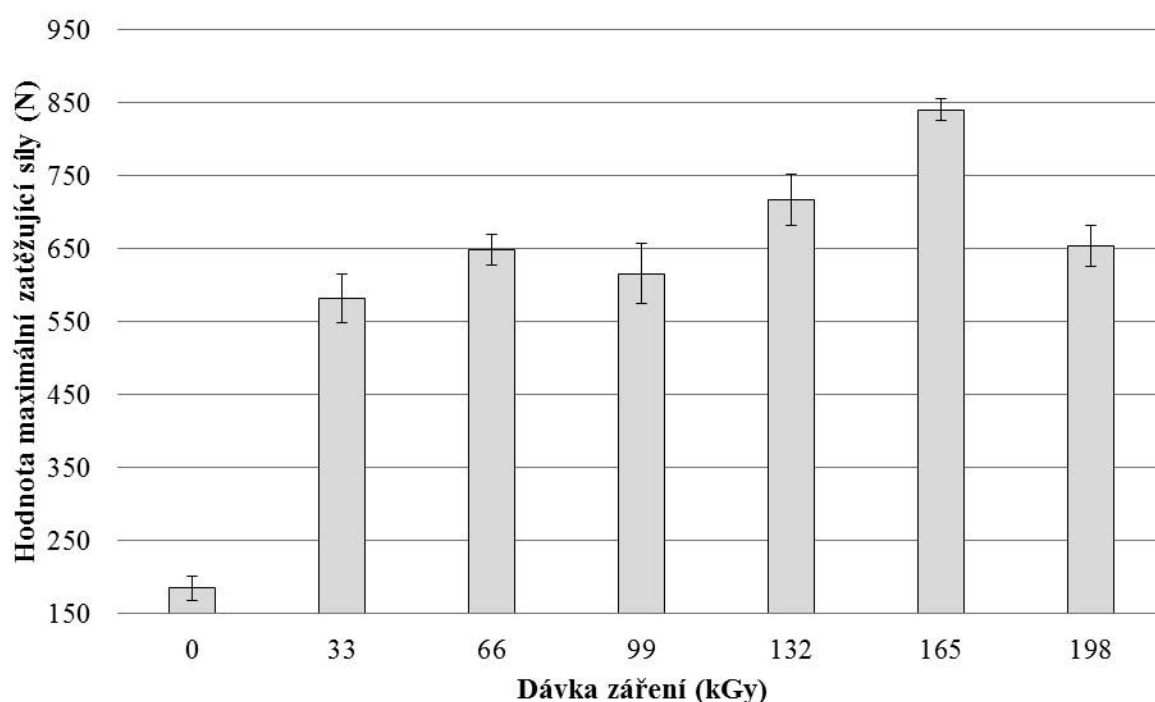
Tab. 8.10: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028.

Kyanoakrylátové lepidlo Cyberbond 2028								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	185,1	582,6	649,2	616,3	717,0	840,6	653,9
	s_x (N)	16,7	33,7	21,5	40,9	35,1	15,2	28,8
LDPE	\bar{x} (N)	119,8	282,6	271,7	290,6	337,0	302,8	322,6
	s_x (N)	11,0	15,2	7,3	14,6	16,2	10,5	8,0
PP	\bar{x} (N)	388,8	800,4	905,1	1001,6			
	s_x (N)	15,8	35,9	28,2	41,3			

Materiál HDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozařeného materiálu HDPE je zřejmé (Tab. 8.10 a Obr. 8.31), že pevnost spoje je závislá na absorbované dávce záření. Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při dávce záření 33 kGy, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 215 %. Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví opět 165 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla o 354 % vůči neošetřenému materiálu.

Dávka záření 198 kGy již nemá tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.10 a Obr. 8.31), naopak dochází u ní dokonce k poklesu (přibližně o 22 % v porovnání s dávkou 165 kGy).

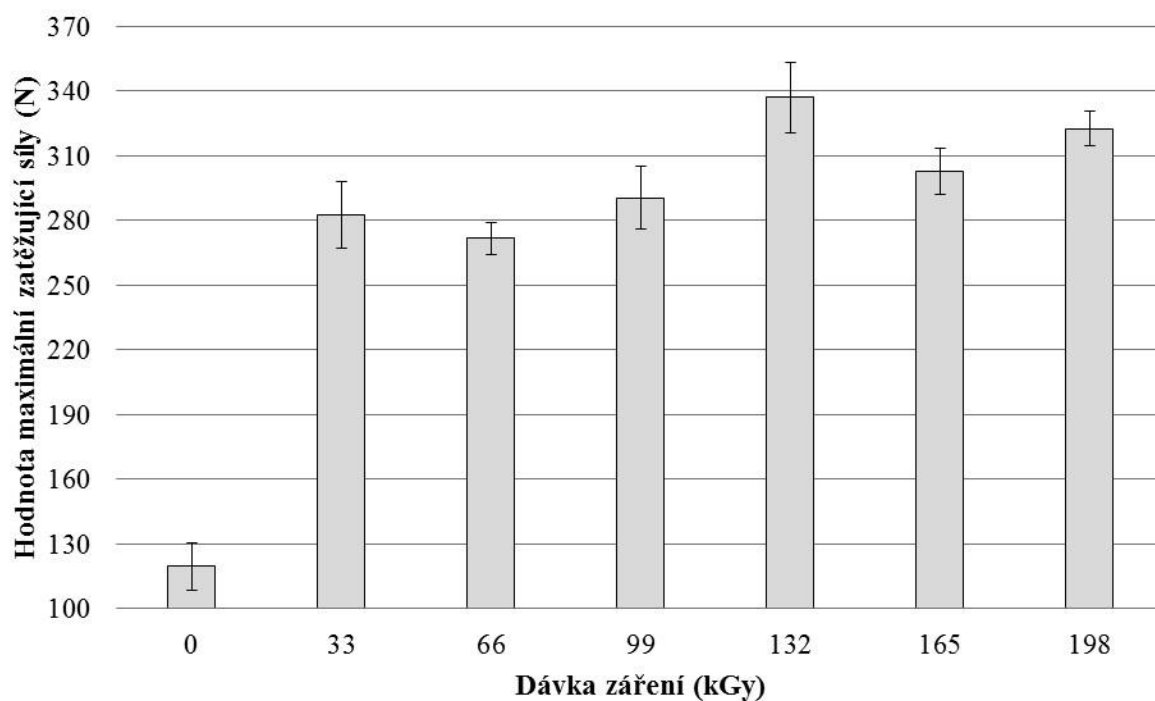


Obr. 8.31: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

Z výsledku měření u materiálu LDPE lze konstatovat, že pevnost lepených spojů je závislá na absorbované dávce záření (Tab. 8.10 a Obr. 8.32). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 136 %, nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při ozáření dávkou 132 kGy, u které byl zaznamenán nárůst o přibližně 181 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem.

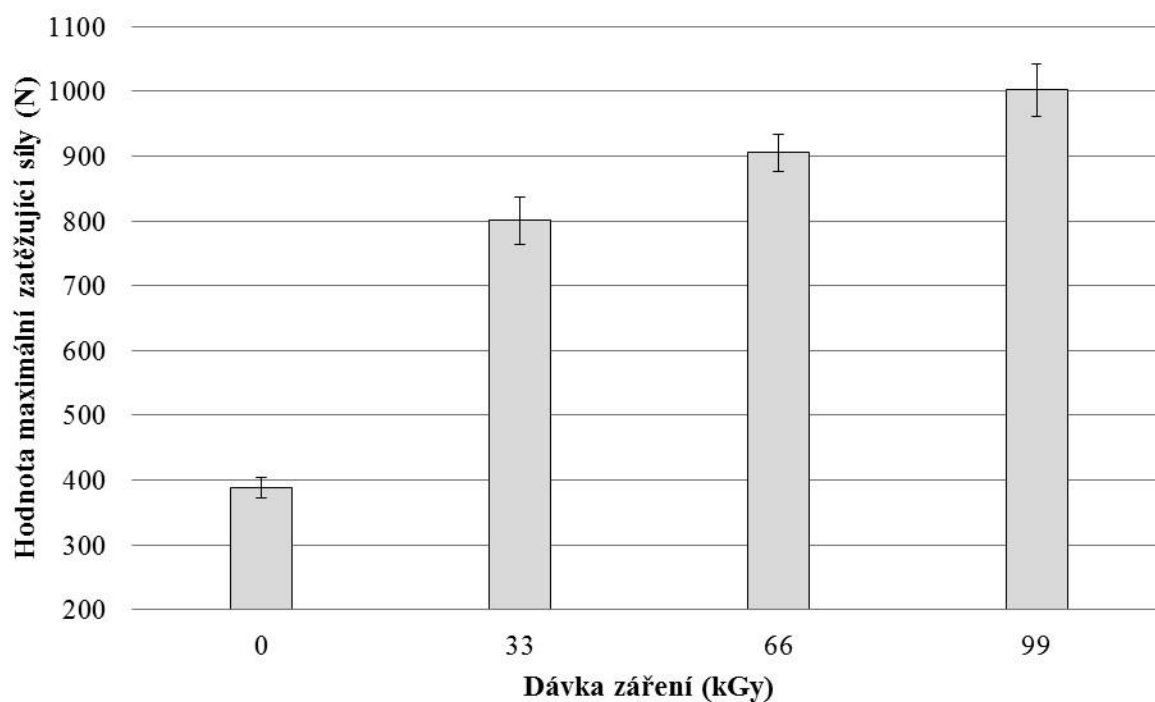
Dávky záření vyšší než 132 kGy již nemají tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.10 a Obr. 8.32), naopak dochází u nich dokonce k poklesu (o více než 5 % v porovnání s dávkou 132 kGy).



Obr. 8.32: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.33) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření.



Obr. 8.33: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 2028, v závislosti na dávce záření.

Při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 99 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 388,8 N na 1001,6 N, což je nárůst o 158 %.

8.5.4 Pevnost lepených spojů za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008

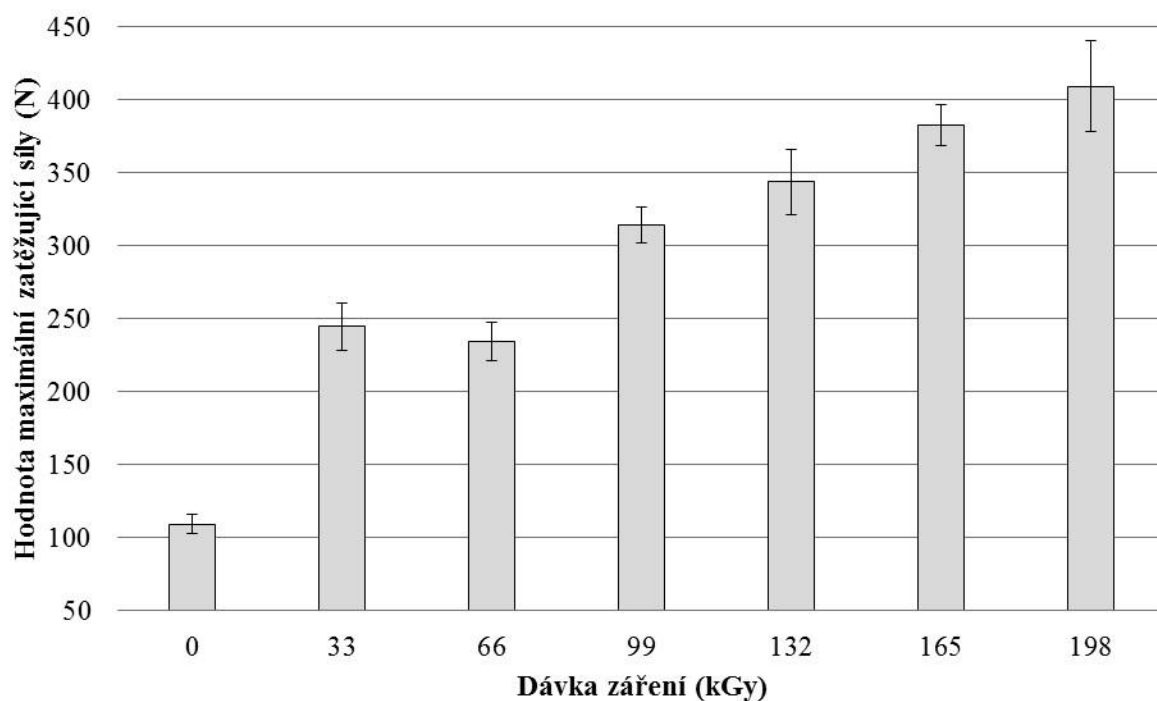
Výsledky měření ukazují (Tab. 8.11, Obr. 8.34, 8.35 a 8.36), že ionizační beta záření zvyšuje pevnost lepených spojů u materiálů HDPE, LDPE a PP za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.

Tab. 8.11: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.

Kyanoakrylátové lepidlo Cyberbond 5008								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	109,3	244,6	234,4	314,4	343,8	382,6	409,2
	s_x (N)	6,3	16,2	13,1	12,3	22,1	14,1	31,2
LDPE	\bar{x} (N)	81,2	138,9	173,0	277,8	261,2	258,1	270,8
	s_x (N)	2,7	9,2	11,9	8,1	12,2	10,9	14,1
PP	\bar{x} (N)	119,9	199,9	182,0	152,6			
	s_x (N)	3,5	7,1	6,6	3,2			

Materiál HDPE

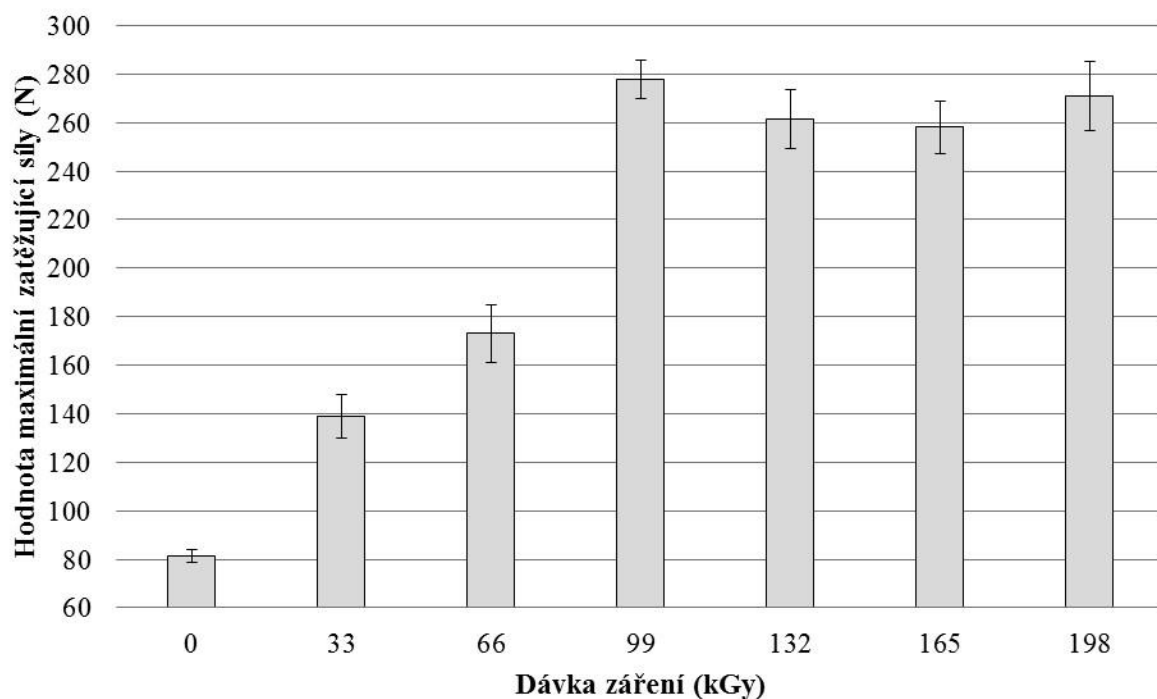
Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozářeného materiálu HDPE je zřejmé (Tab. 8.11 a Obr. 8.34), že pevnost spoje je závislá na absorbované dávce záření. Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při nejnižší dávce, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 124 %. S dávkou 66 kGy dochází k mírnému poklesu (v řádu několika procent), nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo ozářením dávkou 198 kGy, u které došlo k nárůstu přibližně o 274 % v porovnání s nemodifikovaným materiálem.



Obr. 8.34: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

Z výsledku měření u materiálu LDPE lze konstatovat, že v důsledku ozáření došlo k nárůstu pevnosti lepených spojů. (Tab. 8.11 a Obr. 8.35).



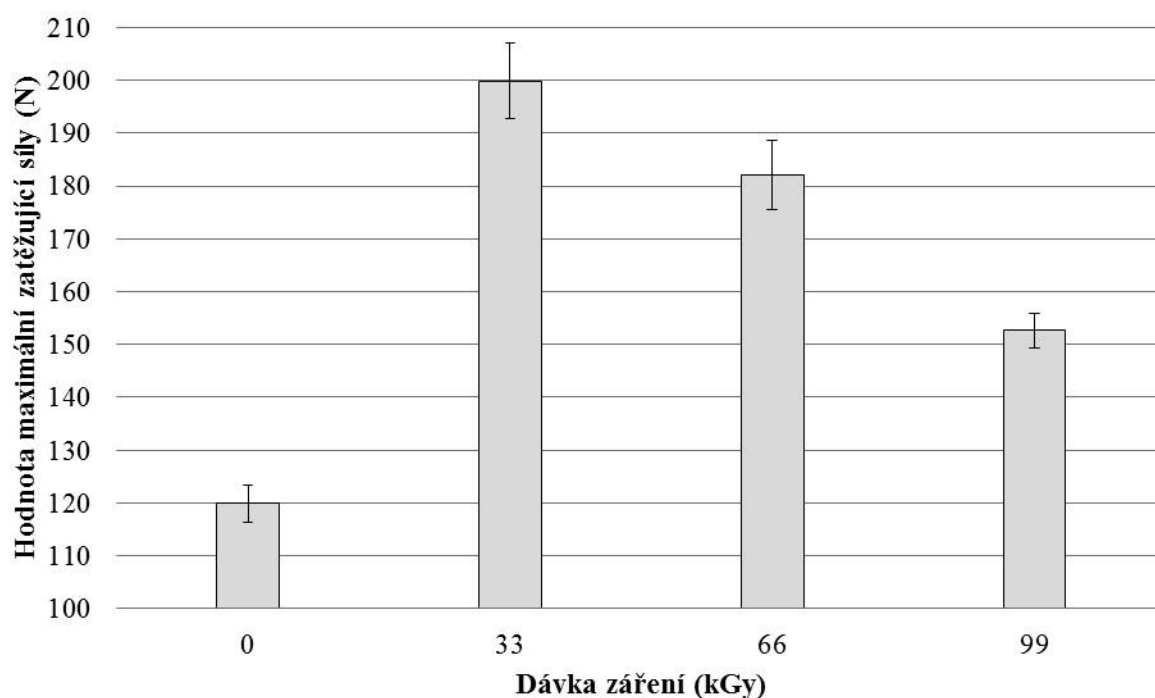
Obr. 8.35: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření.

Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 71 %, nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při ozáření dávkou 99 kGy, u které byl zaznamenán nárůst o přibližně 242 % ve srovnání s neozářeným materiálem.

Dávky záření vyšší než 99 kGy již nemají tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.11 a Obr. 8.35), naopak dochází u nich dokonce k mírnému poklesu (pokles v řádu několika procent v porovnání s dávkou 99 kGy).

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.36) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření. Při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 33 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 119,9 N na 199,9 N, což je nárůst přibližně o 67 %. U dávek záření 66 a 99 kGy došlo k poklesu pevností a z tohoto důvodu se jako nejvhodnější jeví dávka 33 kGy.



Obr. 8.36: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond 5008, v závislosti na dávce záření.

8.5.5 Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA300

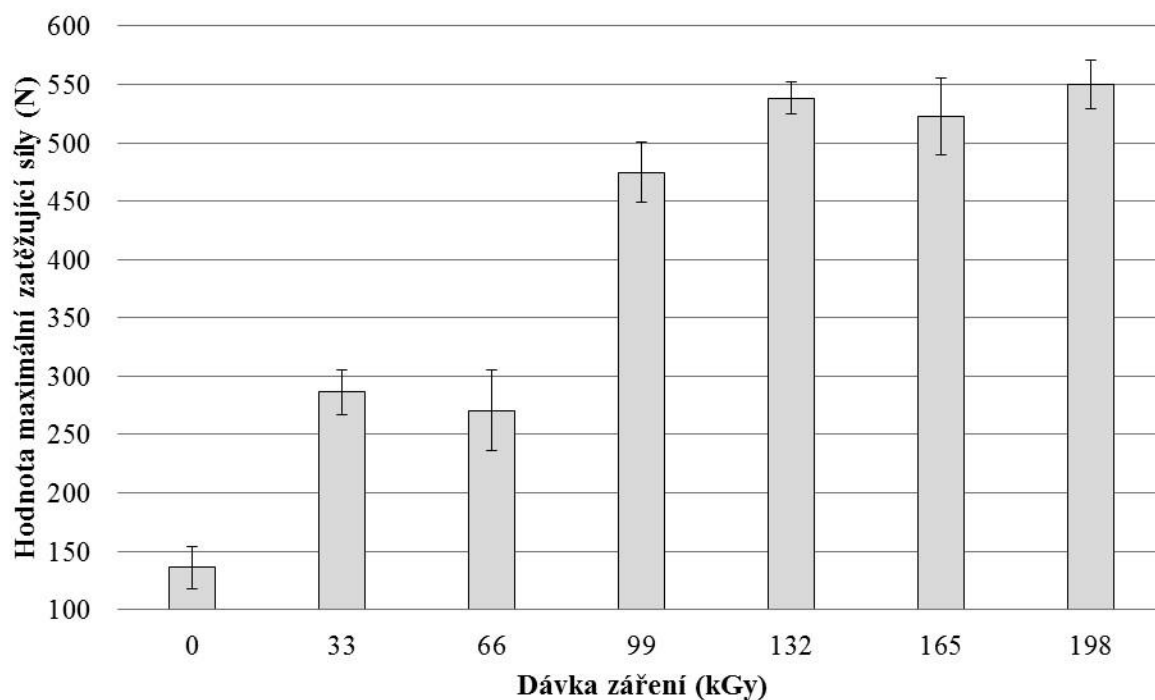
Z naměřených výsledků je zřejmé (Tab. 8.12, Obr. 8.37, 8.38 a 8.39), že po ošetření povrchů zkoumaných materiálů (HDPE, LDPE, PP) ionizačním beta zářením dochází k výraznému nárůstu pevnosti lepených spojů, pro jejichž konstrukci bylo využito 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA300.

Tab. 8.12: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA300.

2-komponentní metakrylátové lepidlo Plexus MA300								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	136,1	286,4	270,6	474,7	538,4	522,5	550,0
	s_x (N)	18,0	19,0	34,3	25,4	13,8	32,5	20,8
LDPE	\bar{x} (N)	64,4	119,6	129,8	168,6	176,8	179,4	225,9
	s_x (N)	8,8	8,3	18,4	14,6	6,1	15,1	10,9
PP	\bar{x} (N)	132,7	686,5	724,9	699,6			
	s_x (N)	5,7	27,9	30,3	23,0			

Materiál HDPE

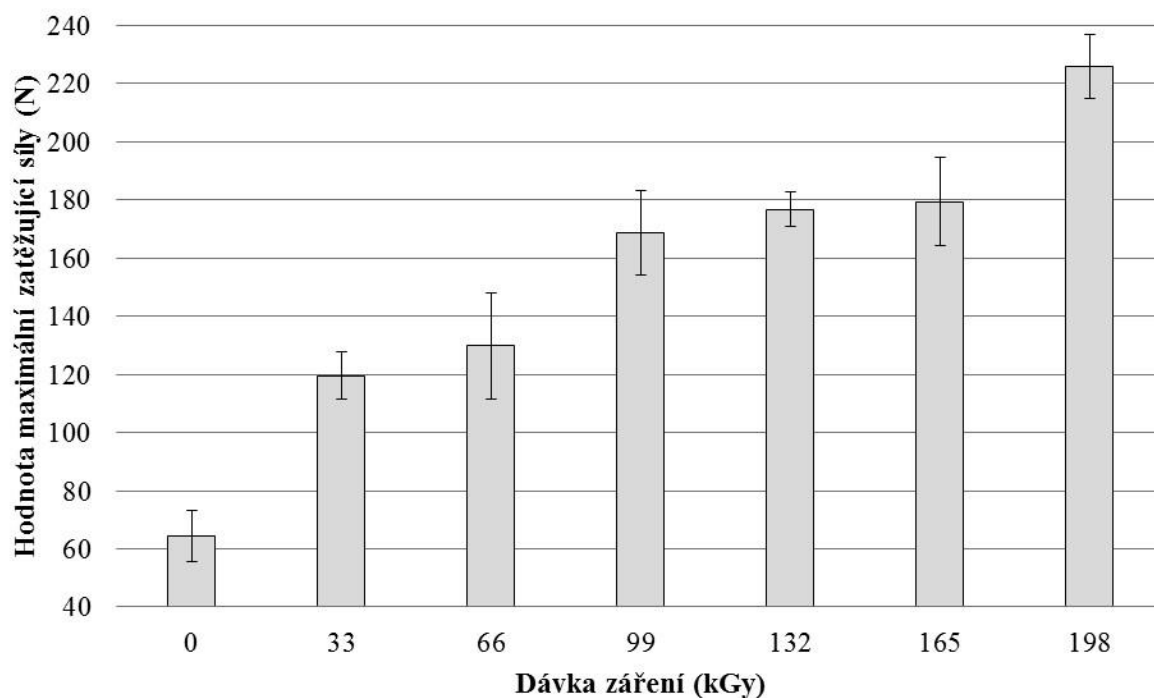
Z výsledku měření u materiálu HDPE lze konstatovat, že pevnost lepených spojů je závislá na absorbované dávce záření (Tab. 8.12 a Obr. 8.37). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 110 %, nicméně nejvyšších pevností spoje bylo dosaženo při ozáření dávkami 132 a 198 kGy, u kterých byl zaznamenán nárůst o přibližně 300 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem. Jako nejvhodnější dávka se proto v tomto případě jeví 132 kGy, jelikož společně s dávkou 198 kGy poskytuje nejvyšší pevnost spoje, ale v porovnání s ní jsou náklady na ozáření nižší.



Obr. 8.37: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

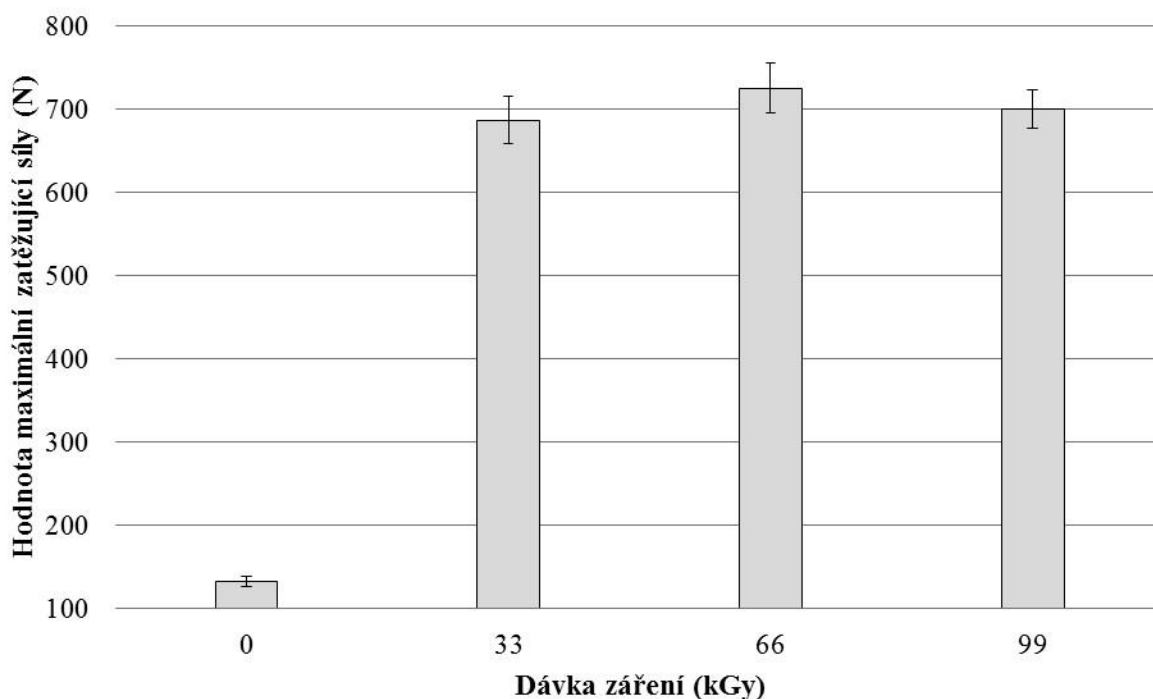
Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozářeného materiálu LDPE je zřejmé (Tab. 8.12 a Obr. 8.38), že pevnost spoje roste se zvyšující se dávkou záření. Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při nejnižší dávce, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 86 %. Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví 198 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla přibližně o 251 % vůči neošetřenému materiálu.



Obr. 8.38: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.39) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření. Při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA300 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 66 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 132,7 N na 724,9 N, což je nárůst přibližně o 446 % vůči nemodifikovanému materiálu. Nicméně, při dávce 33 kGy byla zjištěna únosnost spoje jen o 5 % nižší v porovnání s dávkou 99 kGy. Z tohoto důvodu lze určit jak nejvhodnější dávkou 33 kGy, protože v porovnání s vyššími dávkami vykazuje jen minimální rozdíl v pevnosti, ale na druhou stranu náklady na ozáření budou nižší.



Obr. 8.39: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Plexus MA300, v závislosti na dávce záření.

8.5.6 Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832

Z naměřených výsledků je patrné (Tab. 8.13, Obr. 8.40, 8.41 a 8.42), že po ošetření povrchů zkoumaných materiálů (HDPE, LDPE, PP) ionizačním beta zářením dochází k výraznému nárůstu pevnosti lepených spojů, pro jejichž konstrukci bylo využito 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832.

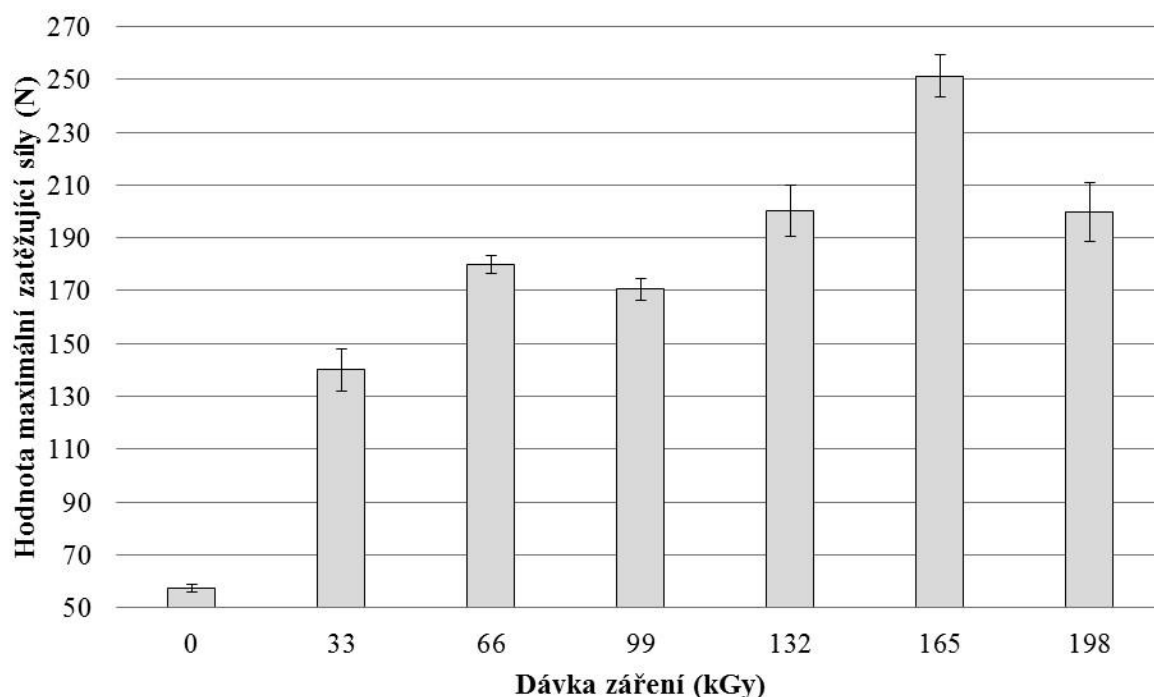
Tab. 8.13: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832.

2-komponentní metakrylátové lepidlo Plexus MA832								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	57,3	140,1	179,9	170,5	200,3	251,1	199,8
	s_x (N)	1,4	8,0	3,6	4,2	9,5	8,0	11,1
LDPE	\bar{x} (N)	49,5	88,2	101,2	137,5	131,0	180,8	204,7
	s_x (N)	5,1	1,4	4,4	6,0	1,1	8,0	8,7
PP	\bar{x} (N)	73,2	198,9	213,0	199,4			
	s_x (N)	2,6	7,0	11,7	8,8			

Materiál HDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neořářeného materiálu HDPE je zřejmé (Tab. 8.13 a Obr. 8.40), že pevnost spoje roste se zvyšující se dávkou záření. Výrazného nárůstu bylo dosaženo již při nejnižší dávce, kdy pevnost spoje vzrostla přibližně o 145 %. Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví 165 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla přibližně o 338 % vůči neošetřenému materiálu.

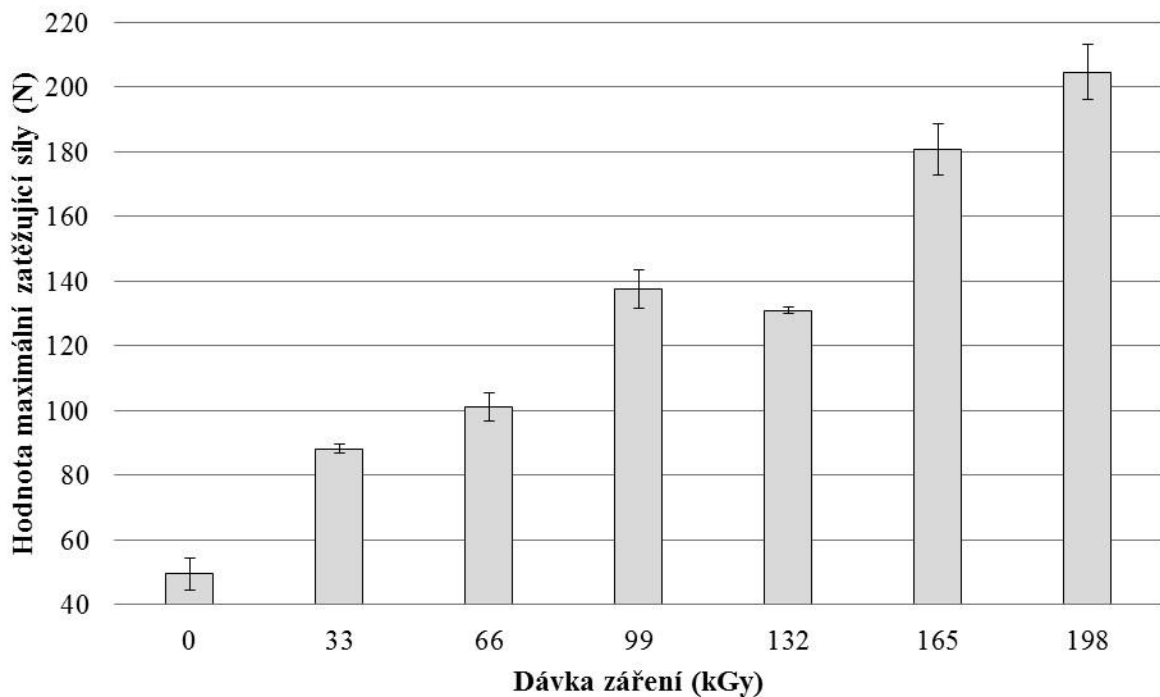
Dávka záření 198 kGy již nemá tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.13 a Obr. 8.40), naopak dochází u ní dokonce k mírnému poklesu (přibližně o 20 % v porovnání s dávkou 165 kGy).



Obr. 8.40: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

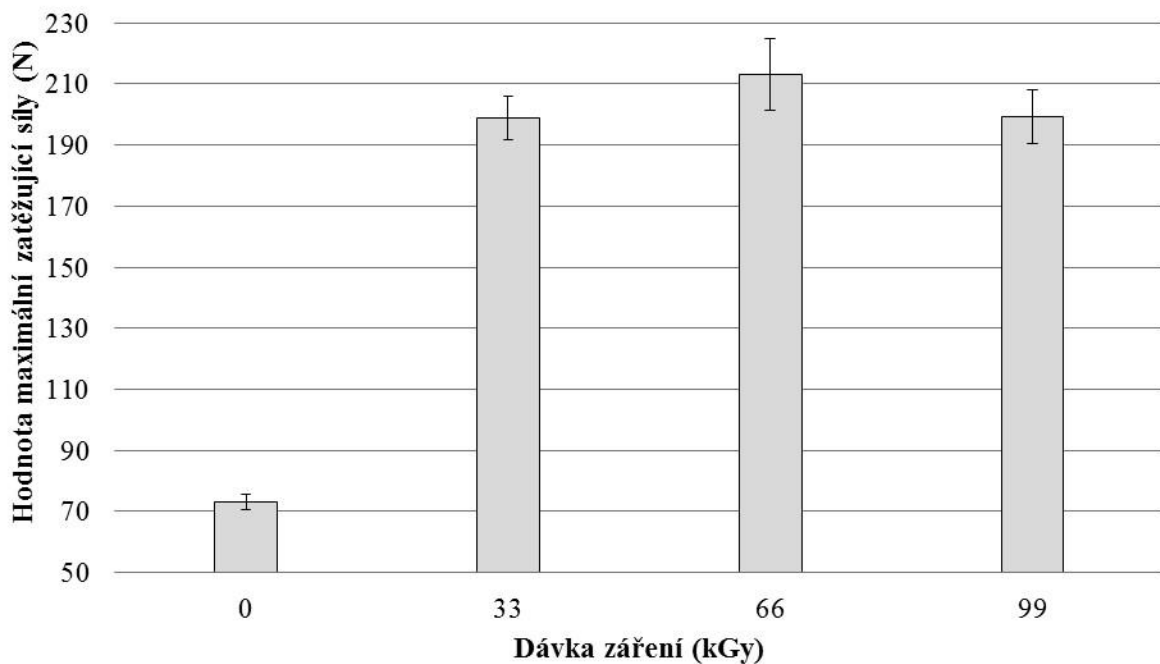
Z výsledku měření u materiálu LDPE lze konstatovat, že pevnost lepených spojů je závislá na absorbované dávce záření (Tab. 8.13 a Obr. 8.41). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 78 %, nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při ozáření dávkou 198 kGy, u které byl zaznamenán nárůst o přibližně 314 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem.



Obr. 8.41: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.42) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření.



Obr. 8.42: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Plexus MA832, v závislosti na dávce záření.

Při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 66 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla ze 73,2 N na 213,0 N, což je nárůst přibližně o 191 % vůči nemodifikovanému materiálu. Nicméně, při dávce 33 kGy byla zjištěna únosnost spoje jen o 7 % nižší v porovnání s dávkou 66 kGy. Z tohoto důvodu lze určit jak nejvhodnější dávkou 33 kGy, protože v porovnání s vyššími dávkami vykazuje jen minimální rozdíl v pevnosti, ale na druhou stranu náklady na ozáření budou nižší.

8.5.7 Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806

Výsledky měření ukazují (Tab. 8.14, Obr. 8.43, 8.44 a 8.45), že ionizační beta záření zvyšuje pevnost lepených spojů u materiálů HDPE, LDPE a PP za použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806.

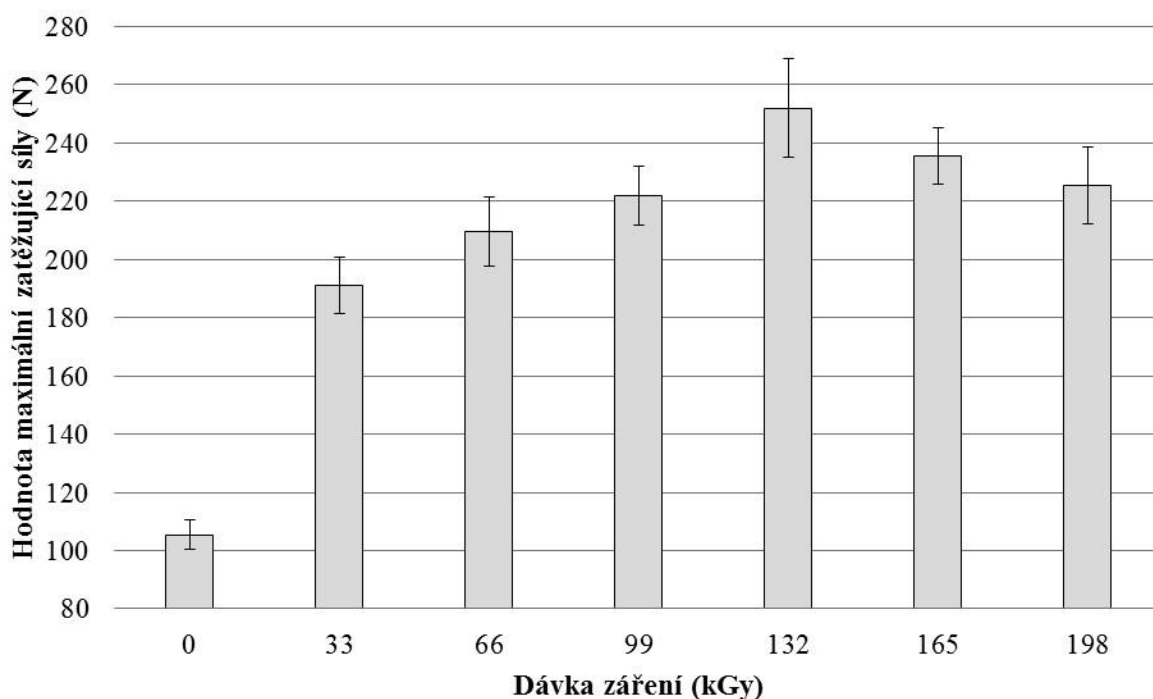
Tab. 8.14: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806.

2-komponentní metakrylátové lepidlo Cyberbond A806								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	105,4	191,2	209,4	221,8	252,0	235,4	225,5
	s_x (N)	5,1	9,7	11,9	10,1	17,1	9,6	13,2
LDPE	\bar{x} (N)	78,7	112,1	152,2	147,2	207,3	184,6	179,3
	s_x (N)	3,6	4,3	6,0	5,7	10,0	9,7	4,1
PP	\bar{x} (N)	112,5	108,6	160,9	194,6			
	s_x (N)	5,4	6,7	6,9	8,1			

Materiál HDPE

Z výsledku měření u materiálu HDPE lze konstatovat, že pevnost lepených spojů je závislá na absorbované dávce záření (Tab. 8.14 a Obr. 8.43). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 81 %, nicméně nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při ozáření dávkou 132 kGy, u které byl zaznamenán nárůst o přibližně 139 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem.

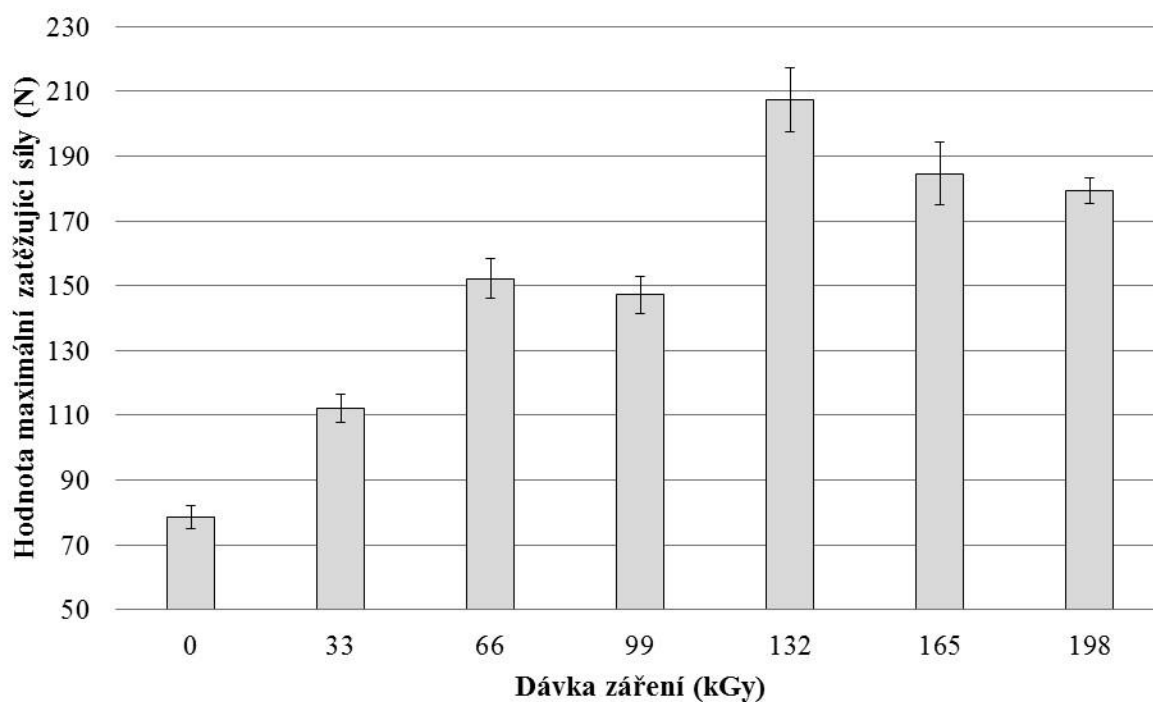
Dávky záření vyšší než 132 kGy již nemají tak pozitivní vliv na výslednou pevnost spoje (Tab. 8.14 a Obr. 8.43), naopak dochází u nich dokonce k poklesu (o více než 6 % v porovnání s dávkou 132 kGy).



Obr. 8.43: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozařeného materiálu LDPE je zřejmé (Tab. 8.14 a Obr. 8.44), že pevnost spoje je závislá na absorbované dávce záření.

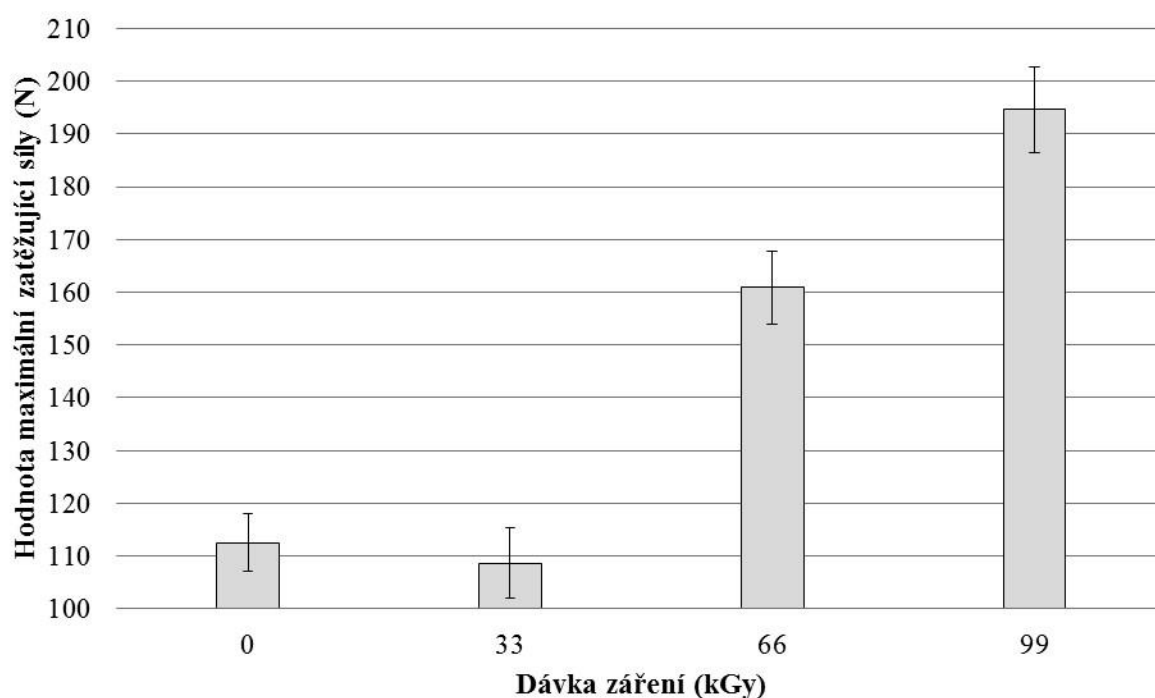


Obr. 8.44: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.

Nárůst únosnosti spoje byl zaznamenán již při dávce záření 33 kGy (nárůst přibližně o 42 % vůči neozářenému materiálu). Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví opět 132 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla o 163 % vůči nemodifikovanému materiálu.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.45) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření.



Obr. 8.45: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond A806, v závislosti na dávce záření.

Při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Cyberbond A806 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 99 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 112,5 N na 194,6 N, což je nárůst přibližně o 73 % vůči nemodifikovanému materiálu.

8.5.8 Pevnost lepených spojů za použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705

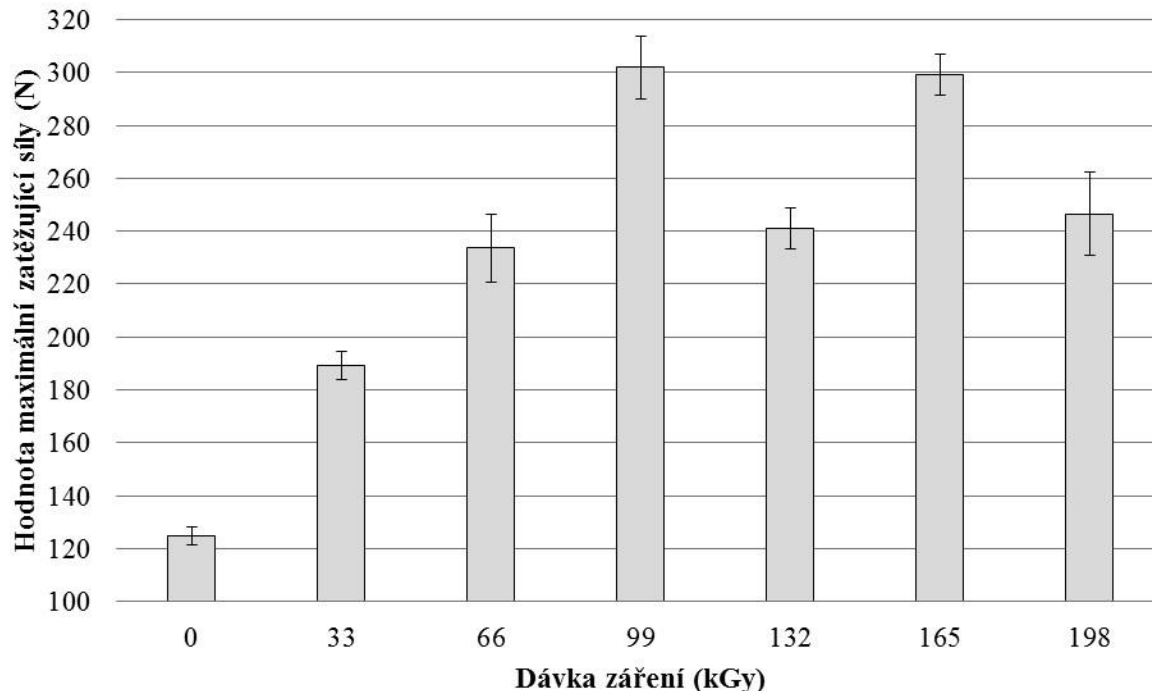
Výsledky měření ukazují (Tab. 8.15, Obr. 8.46, 8.47 a 8.48), že ionizační beta záření zvyšuje pevnost lepených spojů u materiálů HDPE, LDPE a PP za použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705.

Tab. 8.15: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje, při použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705.

2-komponentní epoxidové lepidlo Cyberbond E705								
Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
HDPE	\bar{x} (N)	124,8	189,4	233,7	301,8	240,9	299,1	246,5
	s_x (N)	3,5	5,4	12,8	12,0	7,7	7,6	15,7
LDPE	\bar{x} (N)	112,0	154,3	173,3	173,9	251,0	264,5	253,1
	s_x (N)	3,8	5,5	7,5	11,8	9,2	15,8	10,1
PP	\bar{x} (N)	177,0	292,3	401,8	610,1			
	s_x (N)	3,7	15,8	22,7	20,6			

Materiál HDPE

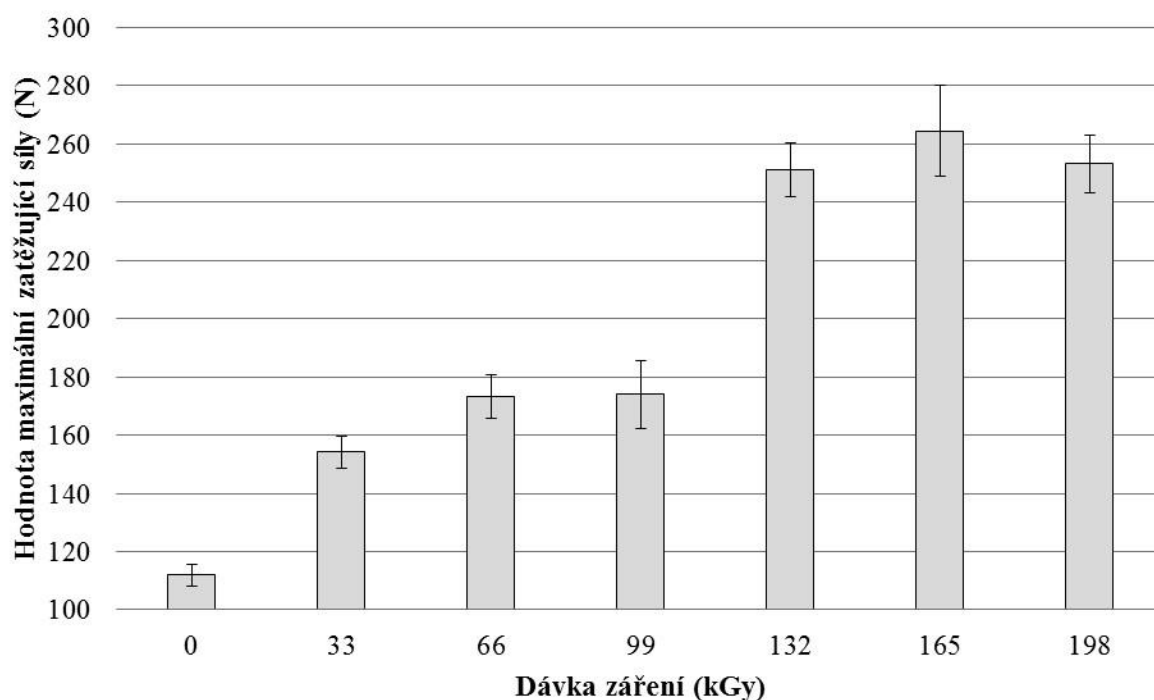
Z výsledku měření u materiálu HDPE lze konstatovat, že pevnost lepených spojů je závislá na absorbované dávce záření (Tab. 8.15 a Obr. 8.46). Již při dávce 33 kGy došlo k nárůstu o 52 %, nicméně nejvyšších pevností spoje bylo dosaženo při ozáření dávkami 99 a 165 kGy, u kterých byl zaznamenán nárůst o přibližně 140 % ve srovnání s nemoifikovaným materiálem. Jako nejvhodnější dávka se proto v tomto případě jeví 99 kGy, jelikož společně s dávkou 165 kGy poskytuje nejvyšší pevnost spoje, ale v porovnání s ní jsou náklady na ozáření nižší.



Obr. 8.46: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE

Při porovnání pevností lepených spojů u ozářeného a neozářeného materiálu LDPE je zřejmé (Tab. 8.15 a Obr. 8.47), že pevnost spoje roste se zvyšující se dávkou záření.

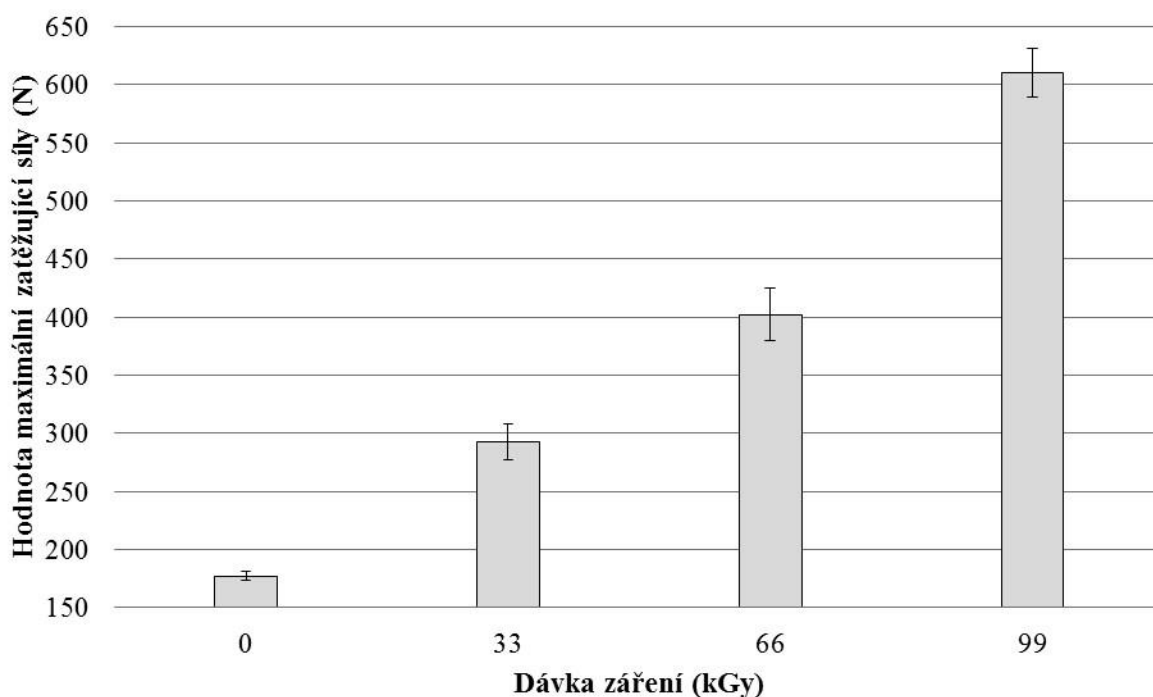


Obr. 8.47: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.

Při použití 2-komponentního epoxidového lepidla Cyberbond E705 byla zjištěna nejvyšší pevnost při ozáření dávkou 165 kGy. V tomto případě hodnota maximální zatěžující síly, která charakterizuje pevnost lepeného spoje, vzrostla z 112,0 N na 264,5 N, což je nárůst přibližně o 136 % vůči nemodifikovanému materiálu. Nicméně, při dávce 132 kGy byla zjištěna únosnost spoje jen o 5 % nižší v porovnání s dávkou 165 kGy. Z tohoto důvodu lze určit jak nejvhodnější dávkou 132 kGy, protože v porovnání s vyššími dávkami vykazuje jen minimální rozdíl v pevnosti, ale na druhou stranu náklady na ozáření budou nižší.

Materiál PP

V následujícím obrázku (Obr. 8.48) jsou znázorněny výsledky pevnosti lepených spojů u materiálu PP v závislosti na absorbované dávce záření. Nárůst únosnosti spoje byl zaznamenán již při dávce záření 33 kGy (nárůst přibližně o 65 % vůči neozářenému materiálu). Jako nejvhodnější dávka se v tomto případě jeví opět 99 kGy, u které pevnost spoje, charakterizovaná maximální zatěžující silou, vzrostla o 245 % vůči nemodifikovanému materiálu.



Obr. 8.48: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, při použití lepidla Cyberbond E705, v závislosti na dávce záření.

8.6 Porovnání únosnosti spojů u ozářených materiálů a u materiálů modifikovaných nízkotlakou plazmou

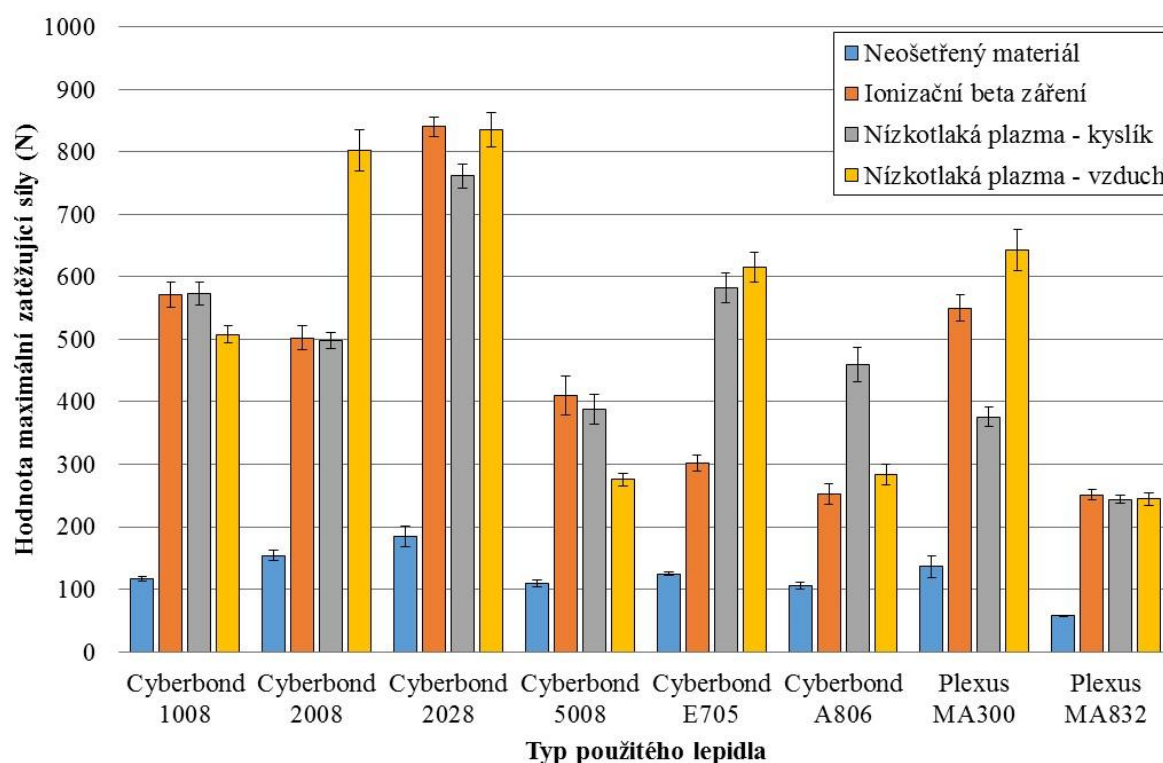
V této kapitole budou porovnány výsledky pevností lepených spojů u materiálů ozářených ionizačním beta zářením se spoji, k jejichž konstrukci bylo využito materiálů modifikovaných nízkotlakou plazmou. Jako pracovní plyny byly použity kyslík a vzduch a délka ošetření byla zvolena 5 minut. Postup výroby a následného testování byl totožný s postupem, který je uveden v kapitole 8.5. Metodu modifikace ionizačním beta zářením zastupuje vždy konkrétní dávka, která pro daný typ materiálu a lepidla vykazovala nejvyšší pevnost lepených spojů (viz. Kap. 8.5).

8.6.1 Materiál HDPE

Při porovnání ionizačního beta záření s modifikací povrchů nízkotlakou plazmou u materiálu HDPE je patrné (Tab. 8.16 a Obr. 8.49), že pevnost spoje je závislá na typu použitého lepidla a způsobu modifikace. Nicméně, ze získaných výsledků je zřejmé, že pevnost spoje získaná ozářením materiálu ionizačním beta zářením dosahuje srovnatelných výsledků jako nízkotlaká plazma. Z výše uvedeného je možno konstatovat, že ionizační beta záření se jeví, při srovnání s modifikací nízkotlakou plazmou, jako efektivní způsob úpravy materiálu HDPE, za účelem zlepšení adhezních vlastností a zvýšení výsledné pevnosti lepeného spoje.

Tab. 8.16: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu HDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

Materiál HDPE									
Typ modifikace		CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Neošetřený materiál	\bar{x} (N)	117,2	153,7	185,1	109,3	124,8	105,4	136,1	57,3
	s_x (N)	3,6	8,0	16,7	6,3	3,5	5,1	18,0	1,4
Ionizační beta záření	\bar{x} (N)	571,1	502,2	840,6	409,2	301,8	252,0	550,0	251,1
	s_x (N)	19,7	19,2	15,2	31,2	12,0	17,1	20,8	8,0
Nízkotlaká plazma – kyslík	\bar{x} (N)	573,3	498,0	761,9	388,6	583,2	459,8	375,5	244,0
	s_x (N)	18,9	13,1	19,5	24,0	23,7	27,6	15,5	5,9
Nízkotlaká plazma – vzduch	\bar{x} (N)	576,1	614,3	810,7	351,1	652,0	602,9	457,3	230,4
	s_x (N)	11,0	18,4	22,2	19,9	18,3	31,0	24,5	4,4



Obr. 8.49: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu HDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

U materiálu HDPE bylo dosaženo nejvyšší pevnosti lepeného spoje, která je charakterizovaná maximální zatěžující silou, při použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 2028. Hodnota maximální zatěžující síly v tomto případě vzrostla z 185,1 N na 840,6 N (u modifikace ionizačním beta zářením), na 761,9 N (u modifikace nízkotlakou plazmou – kyslík) a na 810,7 N (u modifikace nízkotlakou plazmou – vzduch). Nejnižší únosnost spoje u všech typů modifikací byla zjištěna při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla Plexus MA832.

8.6.2 Materiál LDPE

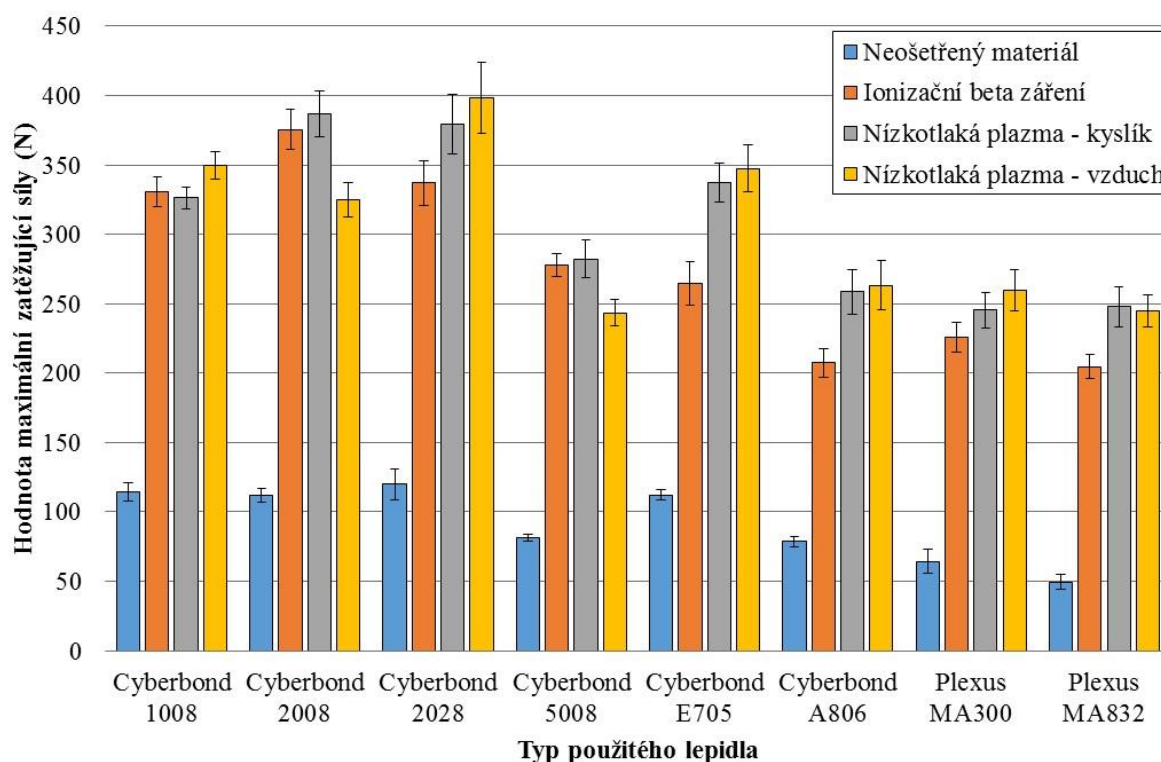
Z naměřených výsledků u materiálu LDPE je zřejmé, že pevnost spoje je závislá na způsobu modifikace a typu použitého lepidla. Z naměřených dat (Tab. 8.17 a Obr. 8.50) lze konstatovat, že ionizační beta záření dosahuje srovnatelných výsledků jako nízkotlaká plazma, vzhledem k únosnosti lepeného spoje. Z výše uvedeného lze usuzovat, že ionizační beta záření se jeví, při porovnání s nízkotlakou plazmou, jako efektivní způsob úpravy materiálu LDPE za účelem zlepšení adhezních vlastností a zvýšení výsledné pevnosti lepeného spoje.

Tab. 8.17: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu LDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

Materiál LDPE									
Typ modifikace		CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Neošetřený materiál	\bar{x} (N)	114,3	111,8	119,8	81,2	112,0	78,7	64,4	49,5
	s_x (N)	6,7	4,7	11,0	2,7	3,8	3,6	8,8	5,1
Ionizační beta záření	\bar{x} (N)	330,6	375,6	337,0	277,8	264,5	207,3	225,9	204,7
	s_x (N)	10,9	14,2	16,2	8,1	15,8	10,0	10,9	8,7
Nízkotlaká plazma – kyslík	\bar{x} (N)	326,1	387,0	379,4	282,0	337,3	258,5	245,2	247,9
	s_x (N)	7,7	16,5	21,3	13,6	13,7	15,8	12,9	14,3
Nízkotlaká plazma – vzduch	\bar{x} (N)	349,3	324,6	398,4	243,4	347,5	263,3	259,6	245,0
	s_x (N)	9,9	12,4	25,9	9,6	16,9	17,8	14,5	11,6

Nejvyšší pevnosti lepeného spoje, u materiálu LDPE, bylo dosaženo za použití kyanoakrylátových lepidel Cyberbond 2008 a 2028. Hodnoty maximální zatěžující síly vzrostly z 111,8 N na 375,6 N (v případě ionizačního beta záření a lepidla 2008), na 387,0 N (v případě nízkotlaké plazmy – kyslík a lepidla 2008) a z 119,8 N na 398,4 N (v případě nízkotlaké plazmy – vzduch a lepidla 2028). Nejnižších

pevností spojů bylo dosaženo u všech způsobů modifikace za použití 2-komponentních metakrylátových lepidel a také za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.



Obr. 8.50: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu LDPE, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

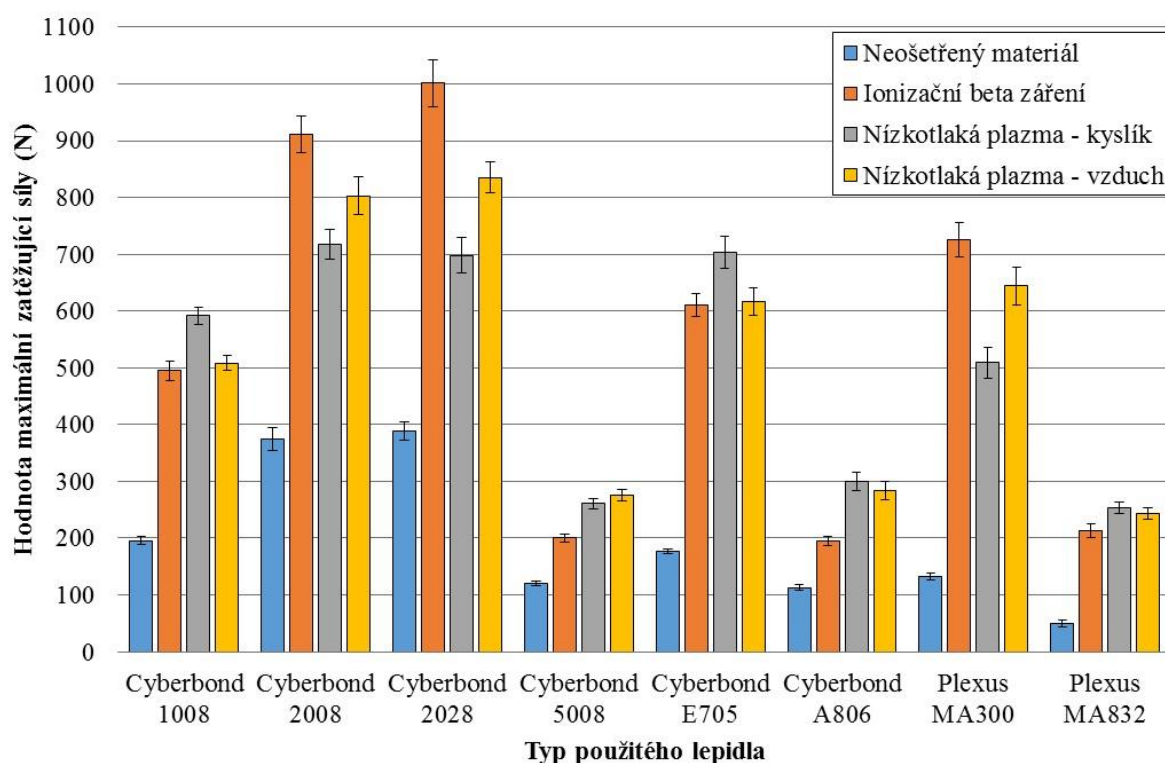
8.6.3 Materiál PP

Z následující tabulky (Tab. 8.18) a obrázku (Obr. 8.51) lze konstatovat, že pevnost spoje, u materiálu PP, je závislá na typu použitého lepidla a způsobu modifikace. Ze získaných výsledků se ionizační beta záření jeví, při porovnání s nízkotlakou plazmou, jako efektivní způsob úpravy materiálu PP za účelem zlepšení adhezních vlastností a zvýšení výsledné pevnosti lepeného spoje.

U materiálu PP bylo dosaženo nejvyšší pevnosti lepeného spoje, která je charakterizovaná maximální zatěžující silou, při použití kyanoakrylátových lepidel Cyberbond 2008 a 2028. Hodnoty maximální zatěžující síly vzrostly z 388,8 N na 1001,6 N (v případě ionizačního beta záření a lepidla 2028), na 835,4 N (v případě nízkotlaké plazmy – vzduch a lepidla 2028) a z 374,7 N na 717,6 N (v případě nízkotlaké plazmy – kyslík a lepidla 2008). Nejnižších pevností spojů bylo dosaženo u všech způsobů modifikace za použití 2-komponentních metakrylátových lepidel (Cyberbond A806 a Plexus MA832) a také za použití kyanoakrylátového lepidla Cyberbond 5008.

Tab. 8.18: Maximální zatěžující síly, které snesly lepené spoje z materiálu PP, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

Materiál PP									
Typ modifikace		CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Neošetřený materiál	\bar{x} (N)	195,1	374,7	388,8	119,9	177,0	112,5	132,7	49,5
	s_x (N)	7,1	20,2	15,8	3,5	3,7	5,4	5,7	5,1
Ionizační beta záření	\bar{x} (N)	494,7	910,8	1001,6	199,9	610,1	194,6	724,9	213,0
	s_x (N)	16,6	32,1	41,3	7,1	20,6	8,1	30,3	11,7
Nízkotlaká plazma – kyslík	\bar{x} (N)	591,4	717,6	698,0	260,4	703,3	299,7	509,0	252,7
	s_x (N)	14,7	26,5	31,1	8,6	27,3	15,2	27,3	9,7
Nízkotlaká plazma – vzduch	\bar{x} (N)	508,0	802,9	835,4	275,8	615,7	284,1	643,9	244,1
	s_x (N)	13,2	33,4	27,8	10,1	24,2	16,6	33,0	10,2



Obr. 8.51: Maximální únosnost lepeného spoje z materiálu PP, v závislosti na použitém lepidle a typu modifikace.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Disertační práce se zabývá vlivem ionizačního beta záření na povrchové vlastnosti a výslednou pevnost lepených spojů u vybraných typů polymerních materiálů. Jako materiály byly zvoleny tři zástupci skupiny polyolefinů (LDPE, HDPE a PP), jejichž vlastnosti nedovolují tyto materiály bez předchozí modifikace povrchu lepit. Jedná se především o vlastnosti spojené s adhezí, jako je např. špatná účinnost smáčení, nízká polarita a nízká povrchová energie, v důsledku kterých je možno tvořit jen velmi nekvalitní adhezní vazby s velmi nízkou únosností lepeného spoje. Z výše uvedených důvodů byl studován vliv ionizačního beta záření a velikost dávek záření na únosnost lepených spojů. Vybrané typy polymerů byly modifikovány ozařováním s dávkami 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy. Ozáření bylo provedeno v Německu ve spolupráci se společností BGS GmbH & Co. KG. Na ozářených zkušebních tělesech byly následně pozorovány změny vlastností povrchové vrstvy (kontaktní úhel smáčení, volná povrchová energie, zastoupení funkčních kyslíkatých skupin aj.) s ohledem na výslednou pevnost lepených spojů.

9.1 Vliv ionizačního beta záření na vlastnosti povrchové vrstvy

Pro posouzení účinku ionizačního beta záření na povrchové vlastnosti bylo využito měření kontaktních úhlů smáčení, volné povrchové energie a také relativního zastoupení karboxylových a hydroxylových skupin, k jejichž určení bylo využito infračervené spektrometrie. Změna kontaktních úhlů smáčení, u materiálů LDPE, HDPE a PP, je prezentována tabulkou 9.1.

Tab. 9.1: Změna kontaktních úhlů smáčení v závislosti na dávce záření.

Materiál	Použitá kapalina	Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
LDPE	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	89,2 (0 %)	78,5 (-12 %)	71,4 (-20 %)	68,2 (-24 %)	66,4 (-26 %)	54,7 (-39 %)	57,6 (-35 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	79,2 (0 %)	71,5 (-10 %)	67,3 (-15 %)	62,7 (-21 %)	62,0 (-22 %)	49,3 (-38 %)	53,1 (-33 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	67,9 (0 %)	59,3 (-13 %)	55,6 (-18 %)	53,5 (-21 %)	50,5 (-26 %)	36,6 (-46 %)	41,3 (-39 %)
HDPE	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	89,2 (0 %)	67,8 (-24 %)	69,4 (-22 %)	63,1 (-29 %)	61,6 (-31 %)	58,0 (-35 %)	60,0 (-33 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	79,1 (0 %)	64,0 (-19 %)	64,3 (-19 %)	60,4 (-24 %)	58,7 (-26 %)	54,6 (-31 %)	54,4 (-31 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	66,3 (0 %)	46,4 (-30 %)	49,8 (-25 %)	43,0 (-35 %)	36,2 (-45 %)	31,1 (-53 %)	33,1 (-50 %)
PP	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	88,1 (0 %)	68,9 (-22 %)	59,5 (-32 %)	60,9 (-31 %)			
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	76,7 (0 %)	58,4 (-24 %)	55,9 (-27 %)	56,5 (-26 %)			
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	63,9 (0 %)	41,7 (-35 %)	36,6 (-43 %)	37,2 (-42 %)			

Z naměřených výsledků je možno vyvodit závěr, že ionizační beta záření výrazně snižuje hodnoty kontaktních úhlů smáčení u všech použitých materiálů. Pokles hodnot úhlů sebou přináší značné zlepšení smáčivosti zkoumaných povrchů. Pro materiály LDPE a HDPE se jako nejvhodnější dávka jeví 165 kGy, u které byl pokles nejvýraznější (přibližně o 31 až 53 % vůči nemodifikovanému materiálu). U materiálu PP je to dávka 66 kGy, u které došlo k poklesu přibližně od 32 do 43 % s ohledem na typ použité kapaliny.

S poklesem kontaktních úhlů smáčení úzce souvisí také změna volné povrchové energie, která je znázorněna pro materiály LDPE, HDPE a PP v tabulce 9.2.

Tab. 9.2: Změna volné povrchové energie v závislosti na dávce záření.

Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
LDPE	Volná povrchová energie (mJ/m ²)	23,5	27,7	31,8	34,4	35,8	45,6	43,2
	Změna volné povrchové energie	0 %	+18 %	+35 %	+46 %	+52 %	+94 %	+84 %
HDPE	Volná povrchová energie (mJ/m ²)	24,4	34,8	33,7	38,3	39,7	42,6	41,4
	Změna volné povrchové energie	0 %	+43 %	+38 %	+57 %	+63 %	+75 %	+70 %
PP	Volná povrchová energie (mJ/m ²)	26,3	37,0	41,4	40,3			
	Změna volné povrchové energie	0 %	+41 %	+57 %	+53 %			

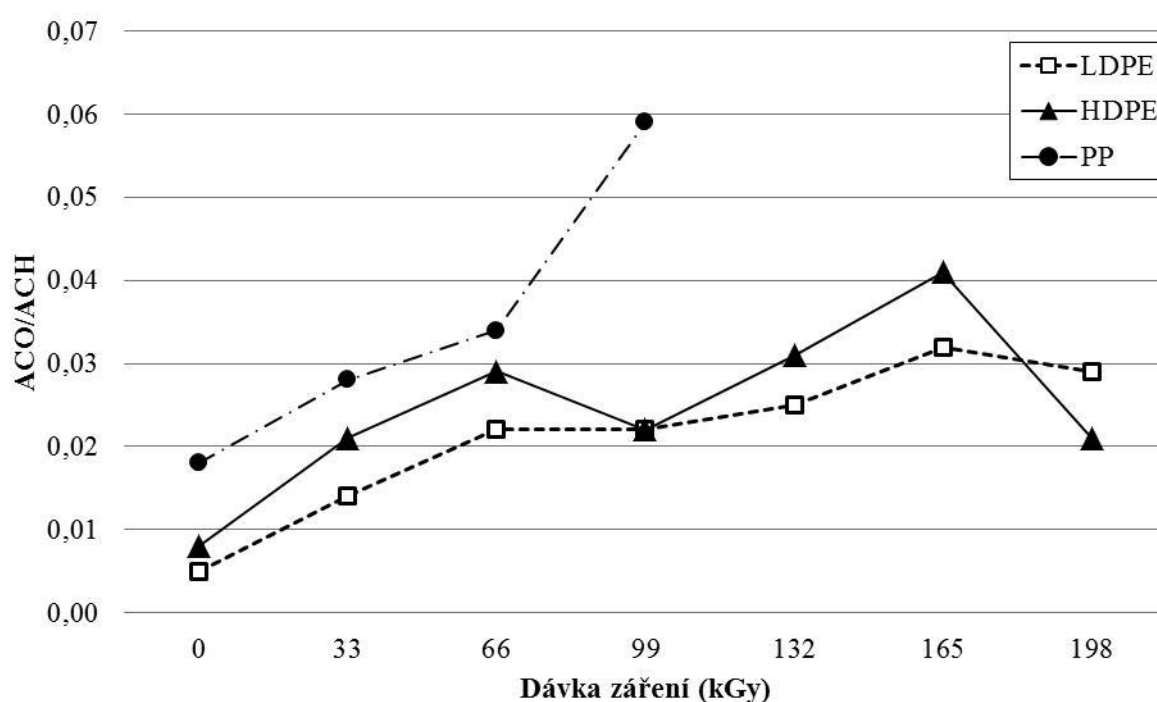
Tab. 9.3: Změna polární složky volné povrchové energie v závislosti na dávce záření.

Materiál		Dávky záření (kGy)						
		0	33	66	99	132	165	198
LDPE	Polární složka volné povrchové energie (mJ/m ²)	5,8	13,2	21,0	23,4	24,7	33,4	32,1
	Změna polární složky	0 %	+128 %	+262 %	+303 %	+326 %	+476 %	+453 %
HDPE	Polární složka volné povrchové energie (mJ/m ²)	5,4	20,8	20,1	26,0	24,7	27,2	24,4
	Změna polární složky	0 %	+285 %	+272 %	+381 %	+357 %	+404 %	+352 %
PP	Polární složka volné povrchové energie (mJ/m ²)	5,2	15,0	27,5	25,4			
	Změna polární složky	0 %	+188 %	+429 %	+388 %			

Při porovnání výsledků lze konstatovat, že se zvyšující dávkou záření dochází k enormnímu nárůstu volné povrchové energie, v důsledku čehož dochází k výraznému zlepšení adhezních vlastností povrchové vrstvy zkoumaných materiálů. U materiálů LDPE a HDPE lze považovat, z hlediska volné povrchové energie,

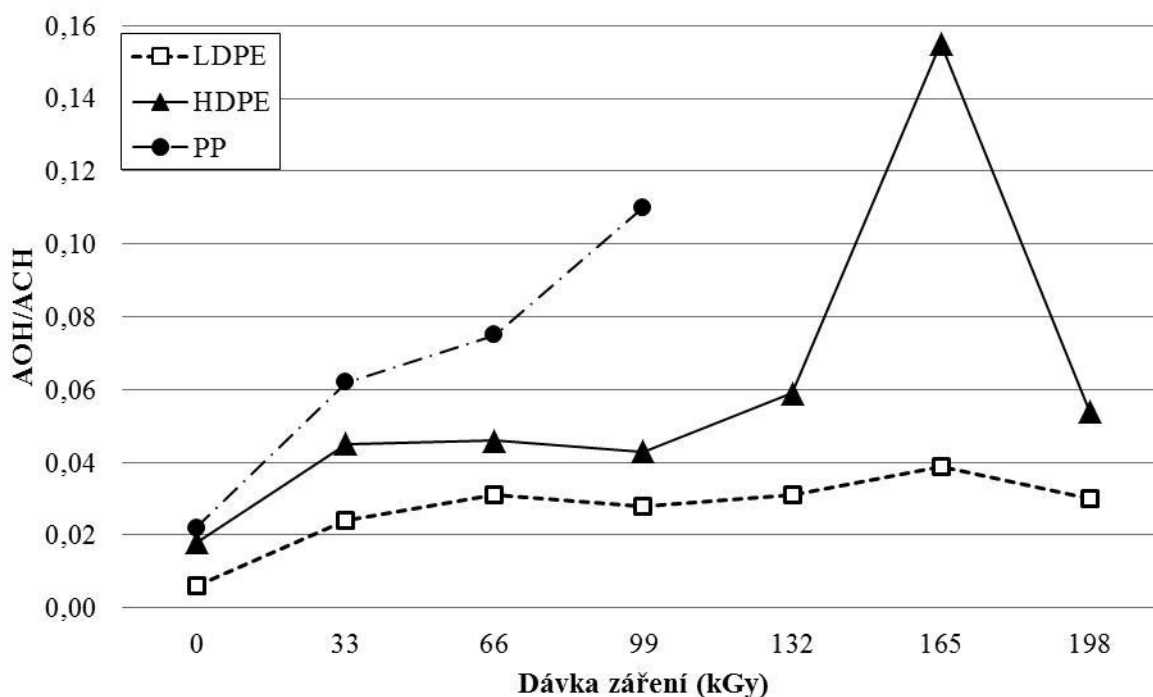
jako nejvhodnější dávku 165 kGy, díky které došlo k nejvyššímu nárůstu (94, respektive 75 %). Pro materiál PP je to dávka 66 kGy, díky které došlo k nárůstu o 57 %. Společně s extrémním nárůstem volné povrchové energie dochází také k nárůstu její polární složky (Tab. 9.3). Nejvyššího nárůstu bylo dosaženo u materiálů LDPE a HDPE taktéž dávkou 165 kGy, a to 476 a 404 %. U materiálu PP je to opět dávka 66 kGy, u které byl zaznamenán nárůst 429 %.

LDPE, HDPE a PP patří do kategorie polymerních materiálů s nízkou povrchovou energií. [12, 18] Ze získaných výsledků lze modifikaci ionizačním beta zářením označit za účinný nástroj pro dosažení povrchů s vysokou povrchovou energií. Dle literatury musí mít vysokoenergetické povrchy polymerních materiálů energii vyšší než 40 mJ/m^2 , tato podmínka byla účinkem ionizačního beta záření splněna u všech zkoumaných materiálů.



Obr. 9.1: Změna relativního zastoupení karbonylových skupin v závislosti na dávce záření (trendové křivky).

Prostřednictvím obrázků 9.1 a 9.2 je prezentována změna relativního zastoupení karbonylových a hydroxylových funkčních skupin v závislosti na absorbované dávce záření. Z naměřených výsledků je zřejmé, že zastoupení kyslíkatých funkčních skupin je závislé na dávce záření. U materiálu LDPE a HDPE je nejvyšší zastoupení při dávce 165 kGy a u materiálu PP při dávce 99 kGy.



Obr. 9.2: Změna relativního zastoupení hydroxylových skupin v závislosti na dávce záření (trendové křivky).

Všechny prezentované změny vlastností povrchové vrstvy (změna kontaktních úhlů smáčení a volné povrchové energie) u materiálů LDPE, HDPE a PP jsou pravděpodobně způsobeny oxidací, která nastává během a po ozáření ionizačním beta zářením. Oxidace má za následek také vznik již zmíněných karbonylových a hydroxylových funkčních skupin. Kinetika procesů, způsobujících vznik těchto degradačních produktů, je s největší pravděpodobností řízena difúzí atmosférického kyslíku v objemu polymeru. Alkylové a allylové radikály reagují s molekulami kyslíku za vzniku karbonylových skupin na povrchu vzorku, zatímco uvnitř vzorku alkylový radikál udává zesíťení a allylový radikál reaguje s kyslíkem za vzniku hydroperoxidových skupin, což je v souladu se zjištěním autorů Mauray [58] a Hama [59].

Na již zmíněnou změnu povrchových vlastností by mohla mít také vliv mimo oxidace, která nastává během ozáření, také postradiační oxidace. Autoři Costa a Carpentieri ve svých studiích uvádějí [60, 61], že na postradiační oxidaci má mimo jiné vliv krystalinita a také velikost krystalických lamel. Toto zjištění by mohlo do jisté míry vysvětlit rozdílné zastoupení kyslíkatých funkčních skupin u materiálu LDPE a HDPE (Obr. 9.1 a 9.2). U naměřených výsledků bylo pozorováno menší zastoupení kyslíkatých funkčních skupin u polyetylenu s nižší krystalinitou (LDPE) v porovnání s polyetylenem s vyšší krystalinitou (HDPE). Tyto výsledky je možno přisuzovat různé reaktivitě makro-alkylových radikálů, které mohou vznikat při ozáření jak v amorfni, tak i v krystalické fázi. Autor Rivaton [62] ve své studii naznačuje hypotézu, že u makro-alkylových radikálů formovaných v amorfni fázi dochází k velmi rychlému rozpadu. Nicméně, další makro-alkylové

radikály mohou migrovat z krystalické fáze do amorfni/krystalické interfáze, kde se stávají přístupnější pro kyslík, což vede k rozvoji postradiační oxidace.

Z výše uvedeného lze tedy usuzovat, že v případě LDPE je oxidace po ozáření jen velmi nízká a je jí dosaženo v relativně krátkém čase. Tento polymer vykazuje velmi tenké lamely v porovnání s HDPE a to má za následek, že doba migrace makro-alkylových radikálů z krystalické fáze do amorfni je velmi krátká.

Naopak, materiál HDPE vykazuje vyšší míru oxidace, které je dosaženo v relativně dlouhém čase po ozáření. V tomto případě, širší krystalické lamely zachycují makro-alkylové radikály a tudíž čas migrace do amorfni fáze je u nich delší. Dle těchto skutečností se čas migrace radikálů z krystalické do amorfni fáze jeví jako jeden z klíčových faktorů, který řídí proces oxidace.

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že zvýšení oxidace povrchové vrstvy materiálů LDPE, HDPE a PP, které je vyvoláno ozářením ionizačním beta zářením, způsobuje zlepšení smáčivosti, zvýšení volné povrchové energie a zlepšení adhezních vlastností.

9.2 Vliv ionizačního beta záření na výslednou pevnost lepených spojů

Jak bylo zjištěno, ionizační beta záření zásadně ovlivňuje vlastnosti povrchové vrstvy. Tyto změny, jejichž hlavním iniciátorem je již zmíněná oxidace, způsobují nárůst únosnosti lepeného spoje u materiálů LDPE, HDPE a PP. Jedná se především o snížení kontaktních úhlů smáčení, nárůst volné povrchové energie a její polární složky a také navýšení kyslíkatých funkčních skupin. K posouzení pevnosti lepených spojů byla měřena maximální zatěžující síla, kterou daný lepený spoj přenáší. Pevnost lepených spojů v závislosti na absorbované dávce záření je prezentována tabulkou 9.4.

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že pro materiály LDPE a HDPE, z hlediska únosnosti lepeného spoje, jsou vhodnější spíše vyšší dávky záření (99 – 198 kGy), u kterých byly zaznamenány nejvyšší nárůsty pevnosti spoje. U materiálu PP nelze jednoznačně říct, že vyšší dávky vykazují nejvyšší nárůst, protože extrémní navýšení bylo dosaženo již při nejnižší dávce záření. Výsledky pevnosti lepených spojů korespondují také s měřením obsahu gelové (zesíťované) fáze, kdy u materiálů LDPE a HDPE byl zaznamenán při nižších dávkách záření jen minimální obsah gelu (Obr. 8.13 a 8.14), zatímco u materiálu PP byl naměřen extrémní nárůst obsahu zesíťované fáze již při nejnižší dávce záření (Obr. 8.15).

Získané výsledky umožňují konstatovat, že ionizační beta záření se jeví jako velmi efektivní nástroj pro navýšení únosnosti lepených spojů materiálů LDPE, HDPE a PP. Nicméně, pro každý materiál a použité lepidlo je nutné individuálně stanovit nejvhodnější dávku záření s ohledem na výsledné požadavky lepeného spoje a na ekonomiku procesu.

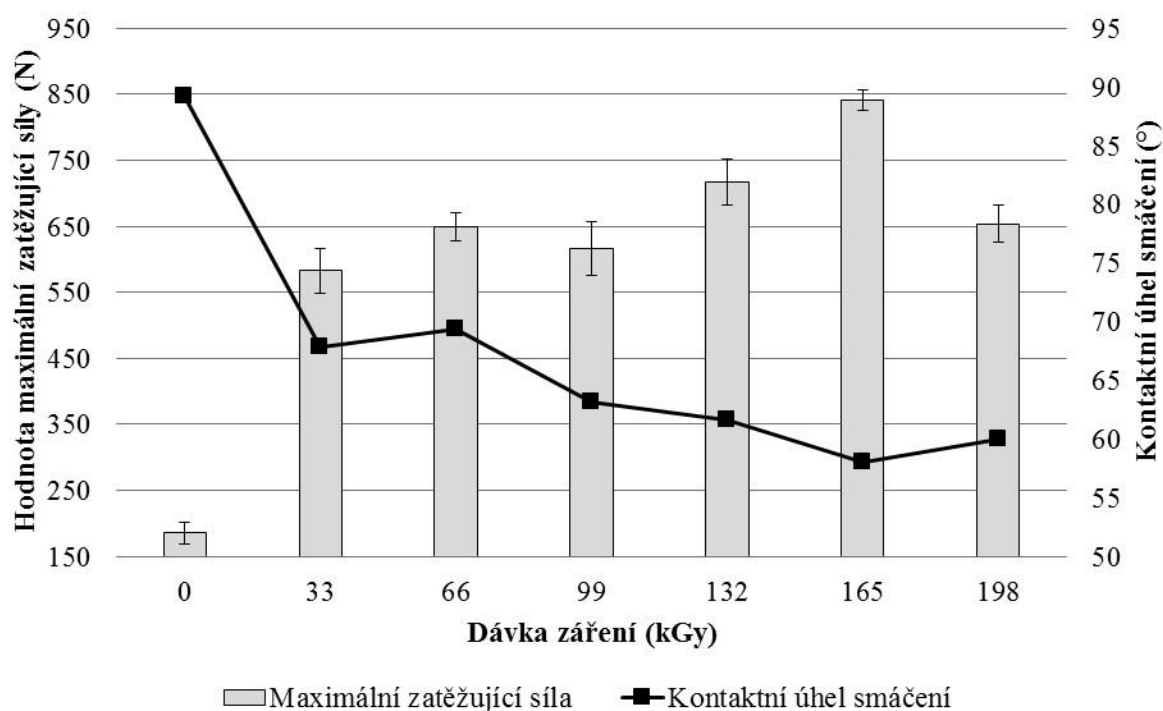
Tab. 9.4: Změna pevnosti lepených spojů v závislosti na dávce záření.

Materiál LDPE							
Použité lepidlo	Dávky záření (kGy)						
	0	33	66	99	132	165	198
Cyberbond 1008	Ref. 114,3 N	+104 %	+119 %	+112 %	+124 %	+189 %	+169 %
Cyberbond 2008	Ref. 111,8 N	+50 %	+97 %	+186 %	+188 %	+233 %	+236 %
Cyberbond 2028	Ref. 119,8 N	+136 %	+127 %	+143 %	+181 %	+153 %	+169 %
Cyberbond 5008	Ref. 81,2 N	+71 %	+113 %	+242 %	+222 %	+218 %	+233 %
Cyberbond A806	Ref. 78,7 N	+42 %	+93 %	+87 %	+163 %	+135 %	+128 %
Plexus MA300	Ref. 64,4 N	+86 %	+102 %	+162 %	+175 %	+179 %	+251 %
Plexus MA832	Ref. 49,5 N	+78 %	+104 %	+178 %	+165 %	+265 %	+314 %
Cyberbond E705	Ref. 112,0 N	+38 %	+55 %	+55 %	+124 %	+136 %	+126 %
Materiál HDPE							
Použité lepidlo	Dávky záření (kGy)						
	0	33	66	99	132	165	198
Cyberbond 1008	Ref. 117,2 N	+192 %	+231 %	+223 %	+282 %	+387 %	+338 %
Cyberbond 2008	Ref. 153,7 N	+87 %	+100 %	+138 %	+135 %	+227 %	+156 %
Cyberbond 2028	Ref. 185,1 N	+215 %	+251 %	+233 %	+287 %	+354 %	+253 %
Cyberbond 5008	Ref. 109,3 N	+124 %	+114 %	+188 %	+215 %	+250 %	+274 %
Cyberbond A806	Ref. 105,4 N	+81 %	+99 %	+110 %	+139 %	+123 %	+114 %
Plexus MA300	Ref. 136,1 N	+110 %	+99 %	+249 %	+296 %	+284 %	+304 %
Plexus MA832	Ref. 57,3 N	+145 %	+214 %	+198 %	+250 %	+338 %	+249 %
Cyberbond E705	Ref. 124,8 N	+52 %	+87 %	+142 %	+93 %	+140 %	+98 %
Materiál PP							
Použité lepidlo	Dávky záření (kGy)						
	0	33	66	99			
Cyberbond 1008	Ref. 195,1 N	+80 %	+154 %	+131 %			
Cyberbond 2008	Ref. 374,7 N	+143 %	+129 %	+116 %			
Cyberbond 2028	Ref. 388,8 N	+106 %	+133 %	+158 %			
Cyberbond 5008	Ref. 119,9 N	+67 %	+52 %	+27 %			
Cyberbond A806	Ref. 112,5 N	-3 %	+43 %	+73 %			
Plexus MA300	Ref. 132,7 N	+417 %	+446 %	+427 %			
Plexus MA832	Ref. 73,2 N	+172 %	+191 %	+172 %			
Cyberbond E705	Ref. 177,0 N	+65 %	+127 %	+245 %			

9.2.1 Závislost povrchových vlastností a dávky záření na výslednou pevnost lepených spojů

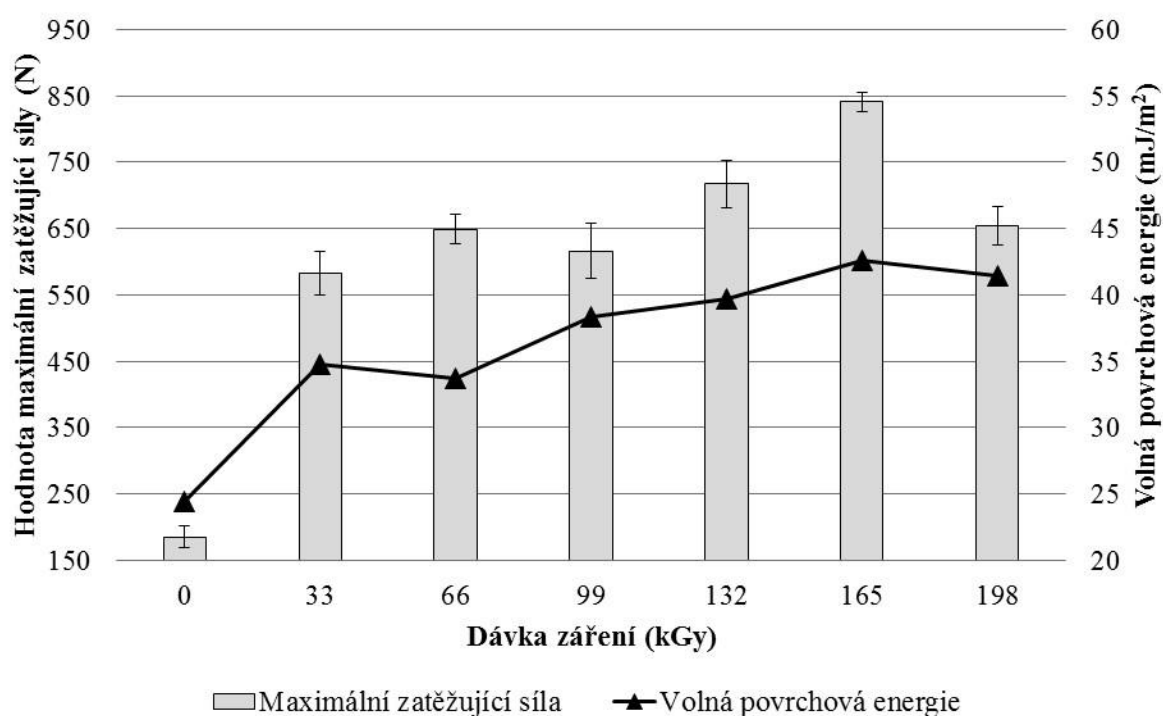
Nárůst únosnosti lepeného spoje je způsoben změnami vlastností povrchové vrstvy v důsledku oxidačních procesů vyvolaných ionizačním beta zářením. Na obrázcích 9.3 až 9.5 je zobrazena výsledná pevnost lepeného spoje v závislosti na povrchových vlastnostech a aplikované dávce záření. Pro názornost byl vybrán jen jeden typ materiálu (HDPE) a jeden typ lepidla (Cyberbond 2028). U ostatních zkoumaných materiálů a lepidel je trend velmi podobný.

Obrázek 9.3 prezentuje změnu pevnosti lepených spojů, která je charakterizována maximální zatěžující silou, v závislosti na dávce záření a hodnotách kontaktních úhlů smáčení. Z naměřených výsledků lze konstatovat, že se zvyšující se dávkou záření dochází k poklesu kontaktních úhlů smáčení a v důsledku toho dochází k extrémnímu nárůstu pevnosti spoje. Toto zjištění je v souladu z odbornou literaturou [2, 5, 8, 12, 18], protože jen s dobrou smáčivostí povrchu (charakterizovanou poklesem kontaktních úhlů) lze dosáhnout vysoké únosnosti spoje.

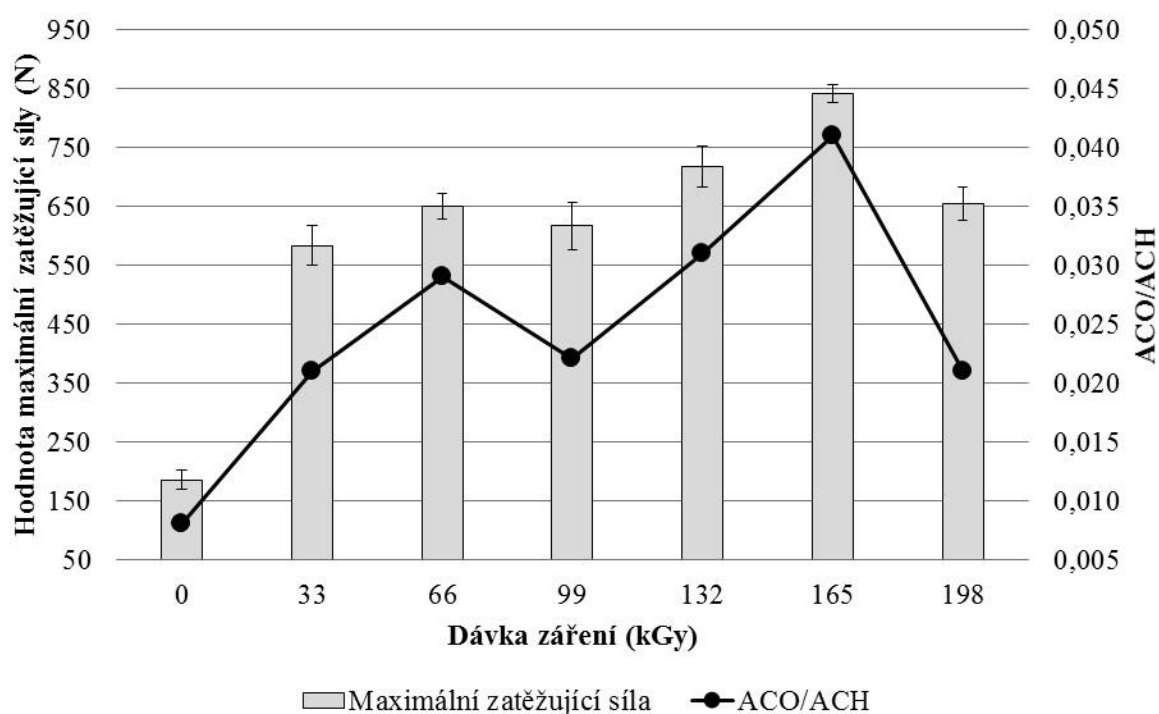


Obr. 9.3: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a kontaktním úhlu smáčení.

Na obrázku 9.4 je zobrazena změna pevnosti lepených spojů v závislosti na dávce záření a volné povrchové energii. Naměřené výsledky ukazují, že se zvyšující se dávkou záření dochází k výraznému nárůstu volné povrchové energie, což má za následek zvýšení pevnosti lepených spojů. Zlepšení adhezních vlastností (charakterizované nárůstem volné povrchové energie), je jedním s nejdůležitějších předpokladů pro vytvoření kvalitního lepeného spoje [8, 12, 18].



Obr. 9.4: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a volné povrchové energii.



Obr. 9.5: Změna maximální únosnosti lepeného spoje v závislosti na dávce záření a relativním zastoupení karbonylových skupin.

Změna maximální zatěžující síly v závislosti na absorbované dávce záření a relativním zastoupení kyslíkatých funkčních skupin je prezentována obrázkem 9.5. Z naměřených výsledků je zřejmé, že v důsledku modifikace ionizačním beta zářením dochází k navýšení zastoupení kyslíkatých funkčních skupin, což má za

následek nárůst pevnosti lepeného spoje. Toto zjištění koresponduje s předchozími studii [15, 24, 26, 27], protože pro vytvoření spoje o vysoké únosnosti je nezbytná právě přítomnost reakceschopných funkčních skupin (karbonylových, hydroxylových) na povrchu lepeného materiálu.

9.2.2 Pevnost lepených spojů u ozářených materiálů a u materiálů modifikovaných nízkotlakou plazmou

Tabulka 9.5 prezentuje porovnání pevností lepených spojů, které jsou charakterizovány maximálními zatěžujícími silami, u materiálů ozářených ionizačním beta zářením s pevnostmi spojů, k jejichž konstrukci bylo využito materiálů modifikovaných nízkotlakou plazmou. Pevnost nelepeného zkušební tělesa připraveného vstříkáním je brána jako referenční hodnota (etalon). Hodnoty uvedené v tabulce 9.5 vyjadřují poměr naměřené pevnosti lepeného spoje vztažený k etalonu.

Tab. 9.5: Maximální únosnost lepených spojů vzhledem k základnímu materiálu.

Materiál LDPE									
Základní materiál	Typ modifikace	CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Ref. 415,1 N (100 %)	Neošetřený materiál	28 %	27 %	29 %	20 %	27 %	19 %	16 %	12 %
	Ionizační beta záření	80 %	90 %	81 %	67 %	64 %	50 %	54 %	49 %
	Nízkotlaká plazma – kyslík	79 %	93 %	91 %	68 %	81 %	62 %	59 %	60 %
	Nízkotlaká plazma – vzduch	84 %	78 %	96 %	59 %	84 %	63 %	63 %	59 %
Materiál HDPE									
Základní materiál	Typ modifikace	CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Ref. 930,3 N (100 %)	Neošetřený materiál	13 %	17 %	20 %	12 %	13 %	11 %	15 %	6 %
	Ionizační beta záření	61 %	54 %	90 %	44 %	32 %	27 %	59 %	27 %
	Nízkotlaká plazma – kyslík	62 %	54 %	82 %	42 %	63 %	49 %	40 %	26 %
	Nízkotlaká plazma – vzduch	62 %	66 %	87 %	38 %	70 %	65 %	49 %	25 %
Materiál PP									
Základní materiál	Typ modifikace	CYBERBOND						PLEXUS	
		1008	2008	2028	5008	E705	A806	MA300	MA832
Ref. 1177,0 N (100 %)	Neošetřený materiál	17 %	32 %	33 %	10 %	15 %	10 %	11 %	4 %
	Ionizační beta záření	42 %	77 %	85 %	17 %	52 %	17 %	62 %	18 %
	Nízkotlaká plazma – kyslík	50 %	61 %	59 %	22 %	60 %	25 %	43 %	21 %
	Nízkotlaká plazma – vzduch	43 %	68 %	71 %	23 %	52 %	24 %	55 %	21 %

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že v porovnání s nízkotlakou plazmou poskytuje ionizační beta záření spoje se srovnatelnou pevností. U všech zkoumaných materiálů a typů modifikací bylo dosaženo nejlepších výsledků při použití kyanoakrylátových lepidel Cyberbond 2008 a 2028. Naopak nejnižších únosností lepených spojů bylo dosaženo použitím 2-komponentních metakrylátových lepidel. Po ozáření materiálu LDPE pevnost spoje dosahovala až 90 % pevnosti základního (nerozstříhaného, nelepeného) materiálu. V porovnání s nízkotlakou plazmou je rozdíl v pevnostech jen v řádu několika procent. U materiálů HDPE a PP bylo dosaženo ionizačním beta zářením vůbec nejvyšších pevností lepených spojů ze všech typů modifikací. U materiálu HDPE pevnost spoje dosahovala až 90 % pevnosti základního materiálu a u PP až 85 % pevnosti základního materiálu.

Ze získaných výsledků je možno konstatovat, že ozářením ionizačním beta zářením je možno dosáhnout takových pevností lepených spojů, které jsou srovnatelné (a v některých případech dokonce vyšší) v porovnání s modifikací nízkotlakou plazmou.

10 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Cílem práce bylo studium vlastností povrchové vrstvy a výsledné pevnosti lepených spojů vybraných polymerních materiálů v závislosti na absorbované dávce ionizačního beta záření.

Hlavní přínosy práce shledávám v následujících bodech:

- Přehled změn vybraných povrchových a adhezních vlastností v závislosti na absorbované dávce záření.
- Popis vlivu ionizačního beta záření na pevnost lepeného spoje (v závislosti na absorbované dávce záření).
- Definování korelace mezi jednotlivými vlastnostmi vzhledem k výsledné pevnosti lepeného spoje.
- Možnost vytvoření kvalitního lepeného spoje u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi.
- Porovnání metody ionizačního beta záření s běžně používanými metodami pro úpravu materiálu před lepením (modifikace nízkotlakou plazmou).
- Definování podmínek modifikace LDPE, HDPE a PP ozařováním k vytvoření lepených spojů s vysokou únosností při použití vybraných typů komerčně dostupných lepidel.
- Umožnění dalšího výzkumu navázáním na získané výsledky, které popisují změnu povrchových a adhezních vlastností a výsledné pevnosti lepených spojů v závislosti na absorbované dávce záření.

11 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá vlivem ionizačního beta záření na povrchové vlastnosti a výslednou pevnost lepených spojů u vybraných typů polymerů. Jako materiály byly zvoleny dva typy polyetylenů (nízko-hustotní a vysoko-hustotní) a jeden typ polypropylenu. Zvolené materiály patří do skupiny polyolefinů a jsou známy svou nízkou povrchovou energií a špatnými adhezními vlastnostmi, díky kterým téměř nelze tyto materiály bez předchozí úpravy povrchu lepit.

Ze získaných výsledků je zřejmé, že ionizační beta záření výrazně zlepšuje smáčivost, což je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení. K poklesu došlo u všech zkoumaných materiálů i použitých referenčních kapalin.

Z hlediska volné povrchové energie bylo zjištěno, že její hodnota roste se zvyšující se dávkou záření. Tento nárůst má za následek enormní zlepšení adhezních vlastností. U materiálů LDPE a HDPE se z pohledu volné povrchové energie jeví jako nejvhodnější dávka 165 kGy, u které byl zaznamenán nárůst jejich hodnot až o téměř 90 %. U materiálu PP byl nárůst přibližně 60%. Podobný trend jako volná povrchová energie měla i její polární složka, která má také nezanedbatelný vliv na výslednou pevnost lepených spojů. U polární složky bylo v důsledku ozáření dosaženo nárůstu u všech zkoumaných materiálů minimálně o 400 %.

Infračervenou spektrometrií byl prokázán účinek ionizačního beta záření na navýšení relativního zastoupení karbonylových a hydroxylových skupin. Relativní zastoupení funkčních skupin rostlo se zvyšující se dávkou záření u všech zkoumaných materiálů. U materiálu LDPE a HDPE bylo zjištěno nejvyšší zastoupení při dávce záření 165 kGy a u materiálu PP při dávce 99 kGy.

Všechny uvedené změny vlastností povrchové vrstvy jsou vyvolány oxidací, která nastává během i po ozáření ionizačním beta zářením. V důsledku těchto změn dochází k enormnímu zvýšení pevnosti lepeného spoje v porovnání s lepeným spojem vytvořeným na neošetřených površích. Nejvyšších nárůstů bylo dosaženo u materiálů LDPE a HDPE při vyšších dávkách záření (99 – 198 kGy). U materiálu PP bylo maximálního navýšení dosaženo v některých případech již při nejnižší dávce (33 kGy). Z použitých lepidel vykazovala nejlepší výsledky kyanokrylátová lepidla Cyberbond, naopak nejnižších únosností spojů bylo dosaženo při použití 2-komponentních metakrylátových lepidel. V důsledku ozáření bylo dosaženo až 390% navýšení pevnosti lepeného spoje v porovnání s nemodifikovaným materiálem. Pevnost spojů po ozáření dosahovala v některých případech až 90 % pevnosti základního (nerozstříhaného, nelepeného) materiálu.

Z naměřených výsledků se ionizační beta záření jeví jako velmi efektivní nástroj pro zlepšení smáčivosti, adhezních vlastností a zvýšení únosnosti lepených spojů u materiálů LDPE, HDPE a PP.

Z hlediska aplikace je však nutné individuálně stanovit nejvhodnější dávku záření s ohledem na výsledné požadavky lepeného spoje a ekonomiku celého procesu.

Získané výsledky představují zcela původní řešení, které vyústilo v podání přihlášky vynálezu PV 2014-510 „Způsob úpravy povrchů dílců z polymerních materiálů před vytvořením lepeného spoje“.

LITERATURA

- [1] BRYDSON, John Andrew. *Plastics materials*. 7th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1999, 920 s. ISBN 07-506-4132-0.
- [2] POCIUS, Alphonsus V. *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2002, xii, 319 s. ISBN 1-56990-319-0.
- [3] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980, 788 s.
- [4] KOVAČIČ, Ludomír. *Lepenie kovov a plastov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1980, 389 s.
- [5] HABENICHT, Gerd. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, c2009, xxxii, 1104 s. ISBN 978-3-540-85264-3.
- [6] OSTEN, Miloš. *Lepení plastických hmot*. 2., opr. vyd. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1974, 150 s.
- [7] LAPCIKOVA, B., L. LAPCIK, P. SMOLKA, R. DLABAJA a D. HUI. Application of radio frequency glow discharge plasma for enhancing adhesion bonds in polymer/polymer joints. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006, vol. 102, issue 2, s. 1827-1833. ISSN 0021-8995.
- [8] BROCKMANN, Walter. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, c2009, xviii, 414 s. ISBN 978-3-527-31898-8.
- [9] BEDNAŘÍK, Martin. *Lepení polymerů*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Ing. David Mañas, Ph.D.
- [10] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [12] EBNESAJJAD, Sina. *Surface treatment of materials for adhesion bonding*. Norwich, NY, U.S.A.: William Andrew Publishing, c2006, xvi, 260 s. ISBN 0-8155-1523-5.
- [13] HOUWINK, Roelof a G. SALOMON. *Adhesion and adhesives*. 2nd revised ed. Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1967, 590 s.
- [14] LANGMAIER, Ferdinand. *Adhese a adhesiva*. 1. vyd. Zlín: FT VUT, 1999, 106 s. ISBN 8021413735.
- [15] LEHOCKÝ, Marián, Hana DRNOVSKÁ, Barbora LAPČÍKOVÁ, A.M. BARROS-TIMMONS, Tito TRINDADE, Maria ZEMBALA a Lubomír LAPČÍK. Plasma surface modification of polyethylene. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003, vol. 222, issue 1-3, s. 125-131. ISSN 0927-7757.

- [16] KLIKORKA, Jiří, Bohumil HÁJEK a Jiří VOTINSKÝ. *Obecná a anorganická chemie*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 591 s.
- [17] WU, Souheng. *Polymer interface and adhesion*. New York: Marcel Dekker, c1982, xiii, 630 s. ISBN 0-8247-1533-0.
- [18] EBNESAJJAD, Sina. *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. 1st pub. Amsterdam: Elsevier, 2011, xx, 427 s. ISBN 978-1-4377-4461-3.
- [19] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vyd. 6., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 262 s. ISBN 978-80-7080-745-3.
- [20] ERBIL, H. *Surface chemistry of solid and liquid interfaces*. 1st pub. Oxford: Blackwell, 2006, xii, 352 s. ISBN 1-4051-1968-3.
- [21] KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
- [22] KWOK, D.Y. The usefulness of the Lifshitz–van der Waals/acid–base approach for surface tension components and interfacial tensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1999, vol. 156, 1-3, s. 191-200. ISSN 0927-7757.
- [23] KWOK, D.Y. a A.W. NEUMANN. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1999, vol. 81, issue 3, s. 167-249. ISSN 0001-8686.
- [24] ŠVORČÍK, V., K. KOLÁŘOVÁ, P. SLEPIČKA, A. MACKOVÁ, M. NOVOTNÁ a V. HNATOWICZ. Modification of surface properties of high and low density polyethylene by Ar plasma discharge. *Polymer Degradation and Stability*. 2006, vol. 91, issue 6, s. 1219-1225. ISSN 0141-3910.
- [25] HANSEN, R. H. a H. SCHONHORN. A new technique for preparing low surface energy polymers for adhesive bonding. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters*. 1966, vol. 4, issue 3, s. 203-209. ISSN 0449-2986.
- [26] VIJAYALAKSHMI, K. A., M. MEKALA, C. P. YOGANAND a K. NAVANEETHA PANDIYARAJ. Studies on Modification of Surface Properties in Polycarbonate (PC) Film Induced by DC Glow Discharge Plasma. *International Journal of Polymer Science*. 2011, vol. 2011, issue 3, s. 1-7. ISSN 1687-9422.
- [27] LEHOČKÝ, M., A. MRÁČEK, C. P. YOGANAND a K. NAVANEETHA PANDIYARAJ. Improvement of dye adsorption on synthetic polyester fibers by low temperature plasma pre-treatment. *Czechoslovak Journal of Physics*. 2006, vol. 56, S2, B1277-B1282. ISSN 0011-4626.
- [28] MAKUUCHI, Keizo a Song CHENG. *Radiation processing of polymer materials and its industrial applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012, xxviii, 415 s. ISBN 978-0-470-58769-0.

- [29] DROBNY, Jiri George. *Ionizing radiation and polymers: principles, technology and applications*. 1st pub. Oxford: Elsevier/William Andrew, 2013, xvi, 298 s. ISBN 978-1-4557-7881-2.
- [30] GHEYSAARI, Dj, A BEHJAT a M HAJI-SAEID. The effect of high-energy electron beam on mechanical and thermal properties of LDPE and HDPE. *European Polymer Journal*. 2001, vol. 37, issue 2, s. 295-302. ISSN 0014-3057.
- [31] SATAPATHY, S., S. CHATTOPADHYAY, K. K. CHAKRABARTY, A. NAG, K. N. TIWARI, V. K. TIKKU a G. B. NANDO. Studies on the effect of electron beam irradiation on waste polyethylene and its blends with virgin polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006, vol. 101, issue 1, s. 715-726. ISSN 1097-4628.
- [32] REICHMANIS, Elsa, C FRANK a James H O'DONNELL. *Irradiation of polymeric materials: processes, mechanisms, and applications*. Washington, DC: American Chemical Society, 1993, xii, 338 s. ISBN 0-8412-2662-8.
- [33] CLEGG, D a A COLLYER. *Irradiation effects on polymers*. London: Elsevier Applied Science, c1991, x, 450 s. ISBN 1-85166-563-3.
- [34] GEHRING, J. a A. ZYBALL. Radiation crosslinking of polymers-status, current issues, trends and challenges. *Radiation Physics and Chemistry*. 1995, vol. 46, 4-6, s. 931-936. ISSN 0146-5724.
- [35] CLOUGH, Roger L a Shalaby W SHALABY. *Irradiation of polymers: fundamentals and technological applications*. Washington, DC: American Chemical Society, 1996, xiii, 433 s. ISBN 0-84-123377-2.
- [36] BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. *Radiační síťování plastů*. 40 s.
- [37] HOLÍK, Zdeněk. *Vliv záření na vlastnosti polymerů - změna vybraných mechanických vlastností v závislosti na absorbované dávce záření*. Zlín, 2013. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [38] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření*. [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>
- [39] DANĚK, Michal. *Vliv záření na vlastnosti polymerů - změna mechanických vlastností radiačně zesíťovaných konstrukčních polymerů v závislosti na absorbované dávce záření*. Zlín, 2013. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [40] LDPE DOW 780E, *Materiálový list*, Dow.
- [41] HDPE DOW 25055E, *Materiálový list*, Dow.
- [42] PP V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800, *Materiálový list*, PTS.
- [43] CYBERBOND 1008, *Technický list*, Cyberbond.
- [44] CYBERBOND 2008, *Technický list*, Cyberbond.
- [45] CYBERBOND 2028, *Technický list*, Cyberbond.
- [46] CYBERBOND 5008, *Technický list*, Cyberbond.

- [47] CYBERBOND A806, *Technický list*, Cyberbond.
- [48] PLEXUS MA300, *Technický list*, Plexus.
- [49] PLEXUS MA832, *Technický list*, Plexus.
- [50] CYBERBOND E705, *Technický list*, Cyberbond.
- [51] ČSN EN 15802, *Česká Technická Norma*, 2010.
- [52] JAŃCZUK, Bronislaw, Wieslaw WÓJCIK a Anna ZDZIENNICKA. Determination of the Components of the Surface Tension of Some Liquids from Interfacial Liquid-Liquid Tension Measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1993, vol. 157, issue 2, s. 384-393. ISSN 0021-9797.
- [53] RIOS, P. F., H. DODIUK, S. KENIG, S. MCCARTHY a A. DOTAN. The effect of polymer surface on the wetting and adhesion of liquid systems. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2007, vol. 21, 3-4, s. 227-241. ISSN 0169-4243.
- [54] KWOK, D. Y., T. GIETZELT, K. GRUNDKE, H.-J. JACOBASCH a A. W. NEUMANN. Contact Angle Measurements and Contact Angle Interpretation. 1. Contact Angle Measurements by Axisymmetric Drop Shape Analysis and a Goniometer Sessile Drop Technique. *Langmuir*. 1997, vol. 13, issue 10, s. 2880-2894. ISSN 0743-7463.
- [55] ŘEZANKOVÁ, Hana a Tomáš LÖSTER. *Základy statistiky*. Vyd. 1. V Praze: Oeconomica, 2013, 95 s. ISBN 9788024519579.
- [56] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 236 s. ISBN 978-80-247-4273-1.
- [57] KHONAKDAR, H.A., S.H. JAFARI, U. WAGENKNECHT a D. JEHNICHEN. Effect of electron-irradiation on cross-link density and crystalline structure of low- and high-density polyethylene. *Radiation Physics and Chemistry*. 2006, vol. 75, issue 1, s. 78-86. ISSN 0969-806X.
- [58] MURRAY, Kieran A., James E. KENNEDY, Brian MCEVOY, Olivier VRAIN, Damien RYAN a Clement L. HIGGINBOTHAM. The effects of high energy electron beam irradiation on the thermal and structural properties of low density polyethylene. *Radiation Physics and Chemistry*. 2012, vol. 81, issue 8, s. 962-966. ISSN 0969-806X.
- [59] HAMA, Yoshimasa, Toshitaka OKA, Junichi UCHIYAMA, Hidenori KANBE, Kenji NABETA a Fumio YATAGAI. Long-term oxidative degradation in polyethylene irradiated with ion beams. *Radiation Physics and Chemistry*. 2001, vol. 62, issue 1, s. 133-139. ISSN 0969-806X.
- [60] CARPENTIERI, Ilenia, Valentina BRUNELLA, Pierangiola BRACCO, Maria Cristina PAGANINI, Elena Maria Brach del PREVER, Maria Paola LUDA, Sara BONOMI a Luigi COSTA. Post-irradiation oxidation of different polyethylenes. *Polymer Degradation and Stability*. 2011, vol. 96, issue 4, s. 624-629. ISSN 0141-3910.
- [61] COSTA, L., I. CARPENTIERI a P. BRACCO. Post electron-beam irradiation oxidation of orthopaedic UHMWPE. *Polymer Degradation and Stability*. 2008, vol. 93, issue 9, s. 1695-1703. ISSN 0141-3910.

-
- [62] RIVATON, A., D. LALANDE a J.-L. GARDETTE. Influence of the structure on the γ -irradiation of polypropylene and on the post-irradiation effects. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2004, vol. 222, issue 1-2, s. 187-200. ISSN 0168-583X.

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Publikace evidované v databázi Web of Science:

- [1] NAVRATIL, Jan, Miroslav MANAS, Ales MIZERA, **Martin BEDNARIK**, Michal STANEK a Michal DANEK. Recycling of irradiated high-density polyethylene. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015, vol. 106, s. 68-72. ISSN 0969-806X.
- [2] MANAS, David, Miroslav MANAS, Lenka CHVATALOVA, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Effect of low doses beta irradiation on thermal, micro and macro mechanical properties of irradiated polypropylene. *Radiation Physics and Chemistry*. 2014, vol. 102, s. 171-177. ISSN 0969-806X.
- [3] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Stepan SANDA a Petr KRATKY. Effect of Beta Irradiation on the Strength of Bonded Joints of HDPE. *Key Engineering Materials*. 2013, vol. 586, s. 79-82. ISSN 1013-9826.
- [4] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK** a Petr KRATKY. Effect of Beta Irradiation on Microhardness of Polyamide 6. *Key Engineering Materials*. 2013, vol. 586, s. 218-221. ISSN 1013-9826.
- [5] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Jakub JAVORIK, **Martin BEDNARIK** a Petr KRATKY. Ionizing Radiation Effect on PMMA Measured by Microhardness. *Key Engineering Materials*. 2013, vol. 586, s. 198-201. ISSN 1013-9826.

Publikace evidované v databázi Scopus:

- [1] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Micro-Hardness of Glass Fiber-Filled PBT Influenced by Beta Low Radiation Doses. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2014, vol. 8, issue 1, s. 1-8. ISSN 1998-0159.
- [2] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Ales MIZERA, Martin OVSIK a Petr KRATKY. Strength of Bonded Joints at Elevated Temperatures after Radiation Cross-Linking, *International Journal of Mechanics*. 2014, vol. 8, issue 1, s. 10-17. ISSN 1998-4448.
- [3] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Karel KOCMAN, **Martin BEDNARIK** a Marcela SPANHELOVA. Effect of beta low irradiation doses on the micromechanical properties of surface layer

- of LDPE. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 405-409. ISSN 1022-6680.
- [4] MANAS, David, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Martin OVSIK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA a Jan NAVRATIL. Micromechanical Properties of Surface Layer of HDPE Modified by Beta Irradiation, *International Journal of Mechanics*. 2014, vol. 8, issue 1, s. 150-157. ISSN 1998-448.
- [5] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Zdenek HOLIK, Michal STANEK, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Temperature Stability of Modified PBT by Radiation Cross-Linking. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 256-260. ISSN 1022-6680.
- [6] REZNICEK, Martin, David MANAS, Michal STANEK, Martin OVSIK, **Martin BEDNARIK**, Adam SKROBAK a Ales MIZERA. Creep of Radiation Cross Linked HDPE at Elevated Temperature. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 555-558. ISSN 1022-6680.
- [7] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Karel KOČMAN, **Martin BEDNARIK** a Petr KRATKY. Nanohardness of Electron Beam Irradiated Polyamide 6.6, *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 606, s. 257-260. ISSN 1013-9826.
- [8] NAVRATIL, Jan, Miroslav MANAS, Michal STANEK, David MANAS, Martin OVSIK, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Hardness and Micro-Indentation Hardness Comparison of Recycled Modified HDPE. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 606, s. 217-220. ISSN 1013-9826.
- [9] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Jan NAVRATIL a Ales MIZERA. Effect of Ionizing Beta Radiation on the Strength of Bonded Joints of Polycarbonate. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 251-255. ISSN 1022-6680.
- [10] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Karel KOČMAN, **Martin BEDNARIK** a Vojtech SENKERIK. Nanohardness of Electron Beam Irradiated HDPE. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 410-414. ISSN 1022-6680.
- [11] OVSIK, Martin, Petr KRATKY, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK a **Martin BEDNARIK**. Micro-Hardness and Morphology of LDPE Influenced by Beta Radiation. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 606, s. 253-256. ISSN 1013-9826.
- [12] NAVRATIL, Jan, Miroslav MANAS, Michal STANEK, David MANAS, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA a Tomas GAVENDA. Utilization of Terahertz Spectroscopy for Optical Behavior Determination of Recycled Modified HDPE. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 547-550. ISSN 1022-6680.

- [13] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Martin OVSIK, Jan NAVRATIL a Ales MIZERA. Surface and Adhesive Properties of Low-Density Polyethylene after Radiation Cross-Linking. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 606, s. 265-268. ISSN 1013-9826.
- [14] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Zdenek HOLIK, Michal STANEK, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Tensile Behaviour of Modified PBT by Radiation Cross-Linking. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1025-1026, s. 261-264. ISSN 1022-6680.
- [15] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Effect of Beta Low Irradiation Doses on the Nano-Hardness of PBT. *International Journal of Mechanics*. 2013, vol. 7, issue 3, s. 310-317, ISSN 1998-4448.
- [16] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Micro-Hardness of Glass Fiber-Filled PA6 Influenced by Beta Irradiation. *International Journal of Mechanics*. 2013, vol. 7, issue 4, s. 500-507. ISSN 1998-4448.
- [17] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Petr KRATKY, Ales MIZERA a **Martin BEDNARIK**. Microhardness of Electron Beam Irradiated Polyamide 6.6. *International Journal of Mechanics*. 2013, vol. 7, issue 3, s. 218-225. ISSN 1998-4448.
- [18] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Petr KRATKY, Ales MIZERA a **Martin BEDNARIK**. Microhardness of Electron Beam Irradiated Polycarbonate. *International Journal of Mechanics*. 2013, vol. 7, issue 4, s. 526-533. ISSN 1998-4448.
- [19] CERNY, Jakub, David MANAS, Zdenek HOLIK, Martin OVSIK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA, Michal STANEK a Miroslav MANAS. Wear of Heavy Industry Tires. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2013, vol. 7, issue 1, s. 9-16. ISSN 1998-0159.
- [20] CERNY, Jakub, David MANAS, Zdenek HOLIK, Martin OVSIK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Methods of Design of Ergonomics Parts. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2013, vol. 7, issue 1, s. 17-24. ISSN 1998-0159.
- [21] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Kamil KYAS, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Microhardness of HDPE Influenced by Beta Irradiation. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012, vol. 6, issue 6, s. 566-574. ISSN 1998-0159.
- [22] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, Zdenek HOLIK, David MANAS, Michal STANEK, Jakub CERNY, **Martin BEDNARIK** a Martin OVSIK.

- Properties of HDPE after Radiation Cross-Linking. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012, vol. 6, issue 6, s. 584-591. ISSN 1998-0159.
- [23] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, Zdenek HOLIK, David MANAS, Michal STANEK, Jakub CERNY, **Martin BEDNARIK** a Martin OVSIK. Properties of Selected Polymers after Radiation Cross-Linking. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012, vol. 6, issue 6, s. 592-599. ISSN 1998-0159.
- [24] NAVRATIL, Jan, Michal STANEK, Miroslav MANAS, David MANAS, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Utilization of DMLS in Injection Mold Design. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 2011, s. 1507-1508. ISSN 1726-9679.
- [25] OVSIK, Martin, David MANAS, Michal STANEK, Miroslav MANAS, Jakub CERNY, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Microhardness of Modified Thermoplastic. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 2011, s. 1187-1188. ISSN 1726-9679.

Publikace ostatní:

- [1] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Ales MIZERA, Martin OVSIK a Petr KRATKY. Effect of Ionizing Beta Radiation on the Strength of Bonded Joints and Adhesive Properties. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*. 2014, vol. 8, s. 84-91. ISSN 2074-1308.
- [2] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Nano-Hardness of PA12 after Cross-linking Due to Beta Radiation. *International Journal of Materials*. 2014, vol. 1, s. 84-92. ISSN 2313-0555.
- [3] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Jan NAVRATIL a Martin REZNICEK. Comparison of Properties between Irradiated PA11 and PA12 by Accelerated Electrons. *International Journal of Materials*. 2014, vo. 1, s. 1-8. ISSN 2313-0555.
- [4] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Jan NAVRATIL a Martin REZNICEK. Properties of LDPE with the Filler of Recycled Irradiated HDPE by accelerated electrons. *International Journal of Materials*. 2014, vol. 1, s. 25-32. ISSN 2313-0555.
- [5] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Jan NAVRATIL, Martin OVSIK, Kamil KYAS a Ales MIZERA. Strength of Bonded Joints of LDPE after Surface Treatment Beta Radiation. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 103-105. ISSN 0009-2770.

- [6] OVSÍK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK** a Petr KRATKY. Effect of Beta Low Irradiation Doses on the Indentation Hardness of Glass Fiber-Filled Polypropylene. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 68-70. ISSN 0009-2770.
- [7] NAVRATIL, Jan, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA a Kamil KYAS. Recycling of Irradiated HDPE – Influence on Material Hardness. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 155-157. ISSN 0009-2770.
- [8] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal DANEK, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Properties of LDPE after Radiation Cross-Linking. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 150-152. ISSN 0009-2770.
- [9] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Kamil KYAS, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Temperature Stability of Modified TPE-E by Radiation Cross-Linking. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 152-155. ISSN 0009-2770.
- [10] KRATKY, Petr, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Martin OVSÍK, Jakub JAVORIK a **Martin BEDNARIK**. Nanohardness of Polymers (Polypropylene). *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 139-141. ISSN 0009-2770.
- [11] KYAS, Kamil, Vladimír PATA, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA a Jan NAVRATIL. Temperature Influence of Rubber Testing Samples During its Preparation. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 59-61. ISSN 0009-2770.
- [12] MANAS, David, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Martin OVSÍK, Petr KRATKY, Jakub JAVORIK a **Martin BEDNARIK**. Microhardness of Polymers Poly (butylene terephthalate) PBT. *Chemické listy*. 2013, vol. 107, s. 62-63, ISSN 0009-2770.
- [13] NAVRATIL, Jan, Michal STANEK, Stepan SANDA, Ales MIZERA, **Martin BEDNARIK**, Kamil KYAS a Jakub CERNÝ. Cooling systems comparison. *Plasty a Kaučuk*. 2012, vol. 49, s. 24-26. ISSN 0322-7340.
- [14] Mizera, Ales, Miroslav MANAS, Jan NAVRATIL a Martin BEDNARIK. Temperature stability of radiation cross-linked polyethylenes. *Plasty a Kaučuk*. 2012, vol. 49, s. 21-23. ISSN 0322-7340.

Konferenční příspěvky (konference mezinárodní):

- [1] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Ales MIZERA, Martin OVSÍK a Petr KRATKY. Effect of Ionizing Beta Radiation on the Strength of Bonded Joints for Increase the Temperature, in *Proc. 14th WSEAS International Conference on Automation &*

- Information*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), s. 131-134, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013.
- [2] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Ales MIZERA, Martin OVSIK a Petr KRATKY. Adhesive Properties and Strength of Bonded Joints of Polymers Treated with Ionizing Beta Radiation, in *Proc. 14th WSEAS International Conference on Automation & Information*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), s. 127-130, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013.
- [3] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Jan NAVRATIL a Martin REZNICEK. Properties of LDPE with the Filler of Recycled Irradiated HDPE, in *Proc. 14th WSEAS International Conference on Automation & Information*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 123-126, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013.
- [4] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Jan NAVRATIL a Martin REZNICEK. Comparison of PA11 and PA12 Properties after Radiation Cross-linking, in *Proc. 14th WSEAS International Conference on Automation & Information*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), s. 119-122, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013.
- [5] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Petr KRATKY, Ales MIZERA a **Martin BEDNARIK**. Effect of Beta Low Irradiation Doses on the Microhardness of PA 66, in *Proc. 17th WSEAS International Conference on Systems*, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), s. 190-195, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013.
- [6] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Petr KRATKY, Ales MIZERA a **Martin BEDNARIK**. Effect of Beta Low Irradiation Doses on the Microhardness of PC, in *Proc. 17th WSEAS International Conference on Systems*, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), s. 196-200, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013.
- [7] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Nano-Indentation Hardness of PA12 after Cross-linking Due to Beta Radiation, in *Proc. 14th*

- WSEAS International Conference on Automation & Informational*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), s. 145-149, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013.
- [8] OVSÍK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Effect of Beta Low Irradiation Doses on the Nano-Indentation Hardness of PBT, *in Proc. 17th WSEAS International Conference on Systems*, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), s. 230-234, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013.
- [9] OVSÍK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, **Martin BEDNARIK**, Petr KRATKY a Ales MIZERA. Micro-Indentation Hardness of Glass Fiber-Filled PA6 Influenced by Beta Irradiation, *in Proc. 17th WSEAS International Conference on Systems*, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), s. 225-229, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013.
- [10] NAVRATIL, Jan, Michal STANEK, Stepan SANDA, Miroslav MANAS, David MANAS, Ales MIZERA a **Martin BEDNARIK**. Utilization of Direct Metal Laser Sintering in Injection Mold Design, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksál, M. (Ed.), s. 273-278, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.
- [11] CERNY, Jakub, Martin OVSÍK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA, David MANAS, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Modern Methods of Design of Ergonomic Parts, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksál, M. (Ed.), s. 321-324, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.
- [12] CERNY, Jakub, Martin OVSÍK, **Martin BEDNARIK**, Ales MIZERA, David MANAS, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Tire Wear of Technical Vehicles, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksál, M. (Ed.), s. 325-328, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.

- [13] OVSIK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Kamil KYAS, **Martin BEDNARIK** a Ales MIZERA. Effect of Beta Irradiation on the Microhardness of HDPE, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksas, M. (Ed.), s. 285-288, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.
- [14] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, Jakub CERNY, **Martin BEDNARIK** a Martin OVSIK. Properties of Polymers after Radiation Cross-linking, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksas, M. (Ed.), s. 303-306, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.
- [15] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK, Jakub CERNY, **Martin BEDNARIK** a Martin OVSIK. Modification of Polymer Properties by Irradiation - Properties of HDPE after Radiation Cross-linking, *Recent Researches in Circuits and Systems - Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, 14 - 17th July 2012, Kos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-108-1, Balas, V. and Koksas, M. (Ed.), s. 299-302, Published by WSEAS Press, Kos Island, Greece, EU, 2012.

Konferenční příspěvky (konference tuzemské):

- [1] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Teplotní odolnost radiačně síťovaných termoplastických polymerů, in *Plastko*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012, s. 244-247, ISBN 978-80-7454-137-7.
- [2] **BEDNARIK, Martin**, David MANAS, Miroslav MANAS, Ales MIZERA a Jan NAVRATIL. Vliv ionizačního záření na pevnost lepených spojů, in *Plastko*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012, s. 248-252, ISBN 978-80-7454-137-7.
- [3] MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, Jan NAVRATIL a **Martin BEDNARIK**. Study of Polymers Temperature Stability, in *8th Annual International Bata Conference for Ph.D. Students and Young Researchers*, 2012, ISBN 978-80-7454-013-4.

Patent:

- [1] MANAS, David, **Martin BEDNARIK** a Miroslav MANAS. *Způsob úpravy povrchů dílců z polymerních materiálů před vytvořením lepeného spoje.* PV 2014-510, 22. 7. 2014.

CV AUTORA

Osobní údaje:

Jméno a příjmení, tituly: Martin Bednařík, Ing.
Datum a místo narození: 27. 3. 1986, Zlín
Bydliště: Pod Sadem 598, Slušovice 763 15
Telefon: +420 603 725 258
E-mail: mbednarik@ft.utb.cz
Státní příslušnost: česká

Vzdělání:

2002 – 2006 Střední průmyslová škola Zlín
Studijní obor: Strojírenství
Zaměření: Počítačové CAD/CAM

2006 – 2009 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Bakalářský studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení

2009 – 2011 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Magisterský studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

2011 – dosud Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Doktorský studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Nástroje a procesy

Pracovní zkušenosti:

- 9/2011 – dosud** UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství
Pozice: lektor – externista
Náplň práce: vedení diplomových a bakalářských prací, příprava a výuka cvičení odborných předmětů (viz. pedagogická činnost)
- 1/2013 – dosud** CEBIA-Tech, Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií
Pozice: Ph.D. student, člen výzkumného týmu Aplikace inženýrské informatiky
Náplň práce: výzkumná činnost, spolupráce s průmyslem
- 1/2013 – 2/2013** Robert Bosch, spol. s.r.o., České Budějovice
Pozice: Stážista
Náplň práce: optimalizace parametrů pro různé způsoby spojování termoplastů (oddělení TEF3 – vývoj nových technologií)

Doplňující informace:

- Bakalářská práce oceněna Ústavem Výrobního inženýrství
- Diplomová práce oceněna děkanem Fakulty technologické
- Člen akademického senátu Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (legislativní komise)

Pedagogická činnost:

- Inženýrská grafika
- Technické kreslení I
- Výrobní stroje a zařízení
- Počítačová podpora konstrukce
- Stavba strojů a zařízení

Znalosti a dovednosti:**Jazykové**

Čeština – mateřský jazyk

Anglický jazyk – aktivně

Německý jazyk – pasivně

Počítačové

Internet (email, www) – pokročilý

Microsoft Office – pokročilý

Microsoft Windows – pokročilý

AutoCAD – pokročilý

Autodesk Inventor – středně pokročilý

CATIA – pokročilý

Pro/ENGINEER – základy

Autodesk Moldflow Insight – pokročilý

CadMould 3D-F – pokročilý