

Hybrid Solder Joints: Viscosity Studies of the Nanocomposite Flux with Fe Nanoparticle Additions

Andriy Yakymovych *, Irina Wodak and Golta Khatibi

Institute of Chemical Technologies and Analytics, TU Wien, 1040 Vienna, Austria;

irina.wodak@tuwien.ac.at (I.W.); golta.khatibi@tuwien.ac.at (G.K.)

* Correspondence: andriy.yakymovych@tuwien.ac.at

The viscosity measurements

The viscosity measurements were performed by a plate–plate rheometer (MCR300 SN621304, Anton Paar - Rheoplus/32) presented in Figure S1.

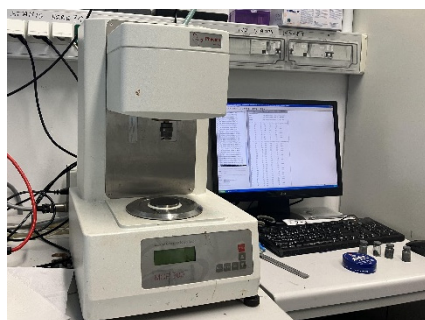


Figure S1. plate–plate rheometer MCR300.

The measured data during two runs of the commercial flux are presented in Tables 1-4, of the flux with 0.5 wt.% Fe NPs are presented in Tables 5-8, of the flux with 1.0 wt.% Fe NPs are presented in Tables 9-12, and of the flux with 2.0 wt.% Fe NPs are presented in Tables 13-16, respectively.

Table S1. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux during first run at the shear rate of 60 s^{-1} .

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	6,330	359	0,022
298	6,300	358	0,022
298	6,220	357	0,024
299	6,020	356	0,022
299	5,730	355	0,023
300	5,390	354	0,024
301	5,040	353	0,023
302	4,710	352	0,025
303	4,380	351	0,024
305	4,070	350	0,024
306	3,790	349	0,026
307	3,520	348	0,024
308	3,270	347	0,027
309	3,040	346	0,027
310	2,820	345	0,026
311	2,630	344	0,029
312	2,450	343	0,028
313	2,280	342	0,029

314	2,130	341	0,031
315	1,980	340	0,029
316	1,840	339	0,032
317	1,700	338	0,032
317	1,560	337	0,032
318	1,430	336	0,035
319	1,290	335	0,034
320	1,160	334	0,037
321	1,040	333	0,041
322	0,932	332	0,044
323	0,837	331	0,058
324	0,750	330	0,096
325	0,673	330	0,204
326	0,606	329	0,359
327	0,540	328	0,540
328	0,486	327	0,753
329	0,436	326	0,962
330	0,388	325	1,140
331	0,350	325	1,270
331	0,311	324	1,350
332	0,280	323	1,420
333	0,252	322	1,490
334	0,223	321	1,560
335	0,201	321	1,640
336	0,178	320	1,730
337	0,159	319	1,810
338	0,144	318	1,900
338	0,127	318	1,980
339	0,117	317	2,080
340	0,106	316	2,200
341	0,094	316	2,300
342	0,089	315	2,420
343	0,079	314	2,520
344	0,074	313	2,640
344	0,069	313	2,780
345	0,062	312	2,900
346	0,059	311	3,040
347	0,054	311	3,180
348	0,050	310	3,300
349	0,049	310	3,460
349	0,044	309	3,610
350	0,042	308	3,780
351	0,041	308	3,950
351	0,036	307	4,120
352	0,037	306	4,300
353	0,034	306	4,520
353	0,032	305	4,710
357	0,027	305	4,920
358	0,024	304	5,090
358	0,024	304	5,200
359	0,024	---	---
360	0,021	---	---
360	0,023	---	---

Table S2. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux during second run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
304	5,260	359	0,019
304	5,180	358	0,021
305	4,990	357	0,021
306	4,730	356	0,020
307	4,450	355	0,022
309	4,200	354	0,021
310	3,940	353	0,021
311	3,610	352	0,023
312	3,280	351	0,021
313	2,970	350	0,023
314	2,710	349	0,023
315	2,480	348	0,022
316	2,230	347	0,025
317	2,010	346	0,023
318	1,800	345	0,025
319	1,610	344	0,026
320	1,450	343	0,024
321	1,290	342	0,027
322	1,170	341	0,026
323	1,060	340	0,026
324	0,954	339	0,028
325	0,862	338	0,027
326	0,788	337	0,029
327	0,727	336	0,030
328	0,664	335	0,029
329	0,613	335	0,032
330	0,563	334	0,031
330	0,517	333	0,032
331	0,473	332	0,034
332	0,433	331	0,033
333	0,403	330	0,038
334	0,369	329	0,046
335	0,331	328	0,070
336	0,307	328	0,115
337	0,274	327	0,178
338	0,256	326	0,277
339	0,233	325	0,416
339	0,196	324	0,591
340	0,163	324	0,782
341	0,132	323	0,942
342	0,107	322	1,060
343	0,093	321	1,150
344	0,079	320	1,210
345	0,069	320	1,260
346	0,064	319	1,320
346	0,055	318	1,380
347	0,052	318	1,450
348	0,048	317	1,520
349	0,042	316	1,600

350	0,041	315	1,680
350	0,037	315	1,760
351	0,035	314	1,850
352	0,035	313	1,950
352	0,030	313	2,050
353	0,031	312	2,150
354	0,029	311	2,250
357	0,021	311	2,360
358	0,023	310	2,480
359	0,021	309	2,590
359	0,020	309	2,720

Table S3. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux during first run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	4,890	357	0,023
298	4,860	358	0,023
298	4,800	358	0,024
299	4,650	359	0,020
299	4,410	360	0,022
300	4,140	360	0,022
301	3,870	359	0,020
302	3,600	358	0,023
304	3,340	357	0,021
305	3,100	356	0,021
306	2,870	355	0,024
307	2,660	354	0,021
308	2,460	353	0,023
309	2,280	352	0,025
310	2,110	351	0,022
311	1,960	350	0,025
312	1,810	349	0,025
313	1,680	348	0,023
314	1,560	347	0,027
315	1,450	346	0,026
316	1,340	345	0,025
317	1,230	344	0,029
318	1,130	343	0,026
319	1,030	342	0,028
319	0,940	341	0,030
320	0,857	340	0,028
321	0,772	339	0,031
322	0,699	338	0,032
323	0,633	337	0,030
324	0,569	336	0,034
325	0,517	335	0,034
326	0,467	334	0,035
327	0,419	333	0,040
328	0,382	332	0,042
329	0,342	331	0,055
330	0,307	330	0,086
331	0,280	330	0,143

331	0,249	329	0,238
332	0,226	328	0,353
333	0,205	327	0,476
334	0,181	326	0,592
335	0,166	325	0,677
336	0,149	325	0,737
337	0,133	324	0,785
338	0,124	323	0,822
339	0,111	322	0,865
339	0,100	321	0,911
340	0,094	321	0,955
341	0,083	320	1,010
342	0,077	319	1,070
343	0,073	318	1,120
344	0,064	318	1,180
345	0,062	317	1,240
345	0,057	316	1,310
346	0,051	316	1,380
347	0,051	315	1,450
348	0,046	314	1,520
349	0,042	314	1,600
349	0,043	313	1,670
350	0,038	312	1,760
351	0,037	312	1,840
352	0,037	311	1,930
352	0,032	310	2,020
353	0,033	310	2,120
354	0,031	309	2,220
---	---	308	2,340
---	---	308	2,440
---	---	307	2,550
---	---	306	2,670
---	---	306	2,790
---	---	305	2,930
---	---	305	3,060
---	---	304	3,170

Table S4. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux during second run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
304	3,260	358	0,020
304	3,180	358	0,021
305	3,020	359	0,021
306	2,830	359	0,018
308	2,650	360	0,021
309	2,450	359	0,019
310	2,260	359	0,018
311	2,080	358	0,021
312	1,900	356	0,019
313	1,740	355	0,019
314	1,580	354	0,022
315	1,430	353	0,019

316	1,300	352	0,022
317	1,170	351	0,022
318	1,050	350	0,020
319	0,947	349	0,023
320	0,851	348	0,022
321	0,762	347	0,021
322	0,690	346	0,025
323	0,622	345	0,023
324	0,561	344	0,023
325	0,513	343	0,026
326	0,465	342	0,023
327	0,424	341	0,026
328	0,392	340	0,027
329	0,357	339	0,025
330	0,330	338	0,028
330	0,307	337	0,028
331	0,281	336	0,027
332	0,264	336	0,031
333	0,244	335	0,029
334	0,224	334	0,030
335	0,209	333	0,033
336	0,191	332	0,030
337	0,175	331	0,034
338	0,165	330	0,036
339	0,149	329	0,041
340	0,131	328	0,064
340	0,112	328	0,097
341	0,090	327	0,151
342	0,080	326	0,238
343	0,069	325	0,343
344	0,058	324	0,466
345	0,056	324	0,578
346	0,050	323	0,656
346	0,044	322	0,714
347	0,045	321	0,758
348	0,039	321	0,796
349	0,037	320	0,838
350	0,037	319	0,879
350	0,032	318	0,922
351	0,033	318	0,971
352	0,031	317	1,020
352	0,027	316	1,070
353	0,029	315	1,130
354	0,027	315	1,190

Table S5. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 0.5 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	10,500	360	0,025
298	10,400	359	0,025
298	10,200	358	0,024
299	9,770	357	0,026

300	9,270	355	0,024
301	8,820	354	0,025
302	8,330	353	0,026
303	7,970	352	0,025
304	7,620	351	0,027
305	7,200	350	0,026
306	6,830	349	0,027
307	6,530	348	0,028
308	6,170	347	0,027
309	5,860	346	0,029
310	5,540	345	0,029
311	5,190	344	0,029
312	4,850	343	0,031
313	4,510	342	0,030
314	4,160	341	0,031
315	3,820	340	0,033
316	3,480	339	0,032
317	3,150	338	0,035
318	2,860	337	0,035
319	2,580	336	0,035
320	2,320	335	0,038
321	2,100	335	0,038
322	1,890	334	0,043
323	1,700	333	0,049
324	1,530	332	0,063
325	1,370	331	0,120
325	1,220	330	0,259
326	1,080	329	0,454
327	0,957	328	0,645
328	0,851	327	0,840
329	0,755	327	1,010
330	0,664	326	1,140
331	0,591	325	1,230
332	0,519	324	1,320
333	0,456	323	1,390
334	0,401	323	1,460
335	0,348	322	1,540
335	0,305	321	1,610
336	0,264	320	1,690
337	0,227	320	1,780
338	0,196	319	1,870
339	0,168	318	1,960
340	0,148	317	2,050
341	0,130	317	2,150
342	0,113	316	2,260
342	0,104	315	2,370
343	0,092	315	2,490
344	0,083	314	2,610
345	0,077	313	2,730
346	0,068	313	2,880
347	0,064	312	3,010
347	0,059	311	3,150
348	0,053	311	3,300

349	0,052	310	3,440
350	0,046	309	3,610
350	0,045	309	3,780
351	0,043	308	3,960
352	0,038	307	4,130
353	0,039	307	4,310
353	0,036	306	4,500
354	0,034	306	4,700
358	0,028	305	4,900
358	0,025	304	5,100
359	0,026	304	5,250
359	0,026	303	5,450
360	0,023	---	---

Table S6. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 0.5 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
304	5,340	359	0,024
304	5,300	359	0,022
305	5,090	358	0,023
306	4,820	357	0,024
307	4,530	356	0,022
308	4,230	355	0,025
309	3,940	354	0,024
310	3,640	353	0,024
311	3,360	352	0,026
312	3,100	351	0,024
313	2,840	350	0,026
314	2,600	349	0,026
315	2,360	348	0,026
316	2,140	347	0,028
317	1,940	346	0,027
318	1,760	345	0,028
319	1,590	344	0,029
320	1,440	343	0,028
321	1,310	342	0,031
322	1,190	341	0,030
323	1,080	340	0,030
324	0,979	339	0,032
325	0,889	338	0,031
326	0,811	337	0,033
327	0,740	336	0,034
328	0,678	335	0,033
329	0,621	334	0,036
330	0,572	333	0,035
331	0,526	332	0,037
332	0,489	331	0,039
333	0,452	331	0,041
334	0,421	330	0,061
334	0,394	329	0,107
335	0,364	328	0,198
336	0,339	327	0,340

337	0,308	326	0,513
338	0,276	326	0,679
339	0,252	325	0,829
340	0,217	324	0,947
341	0,178	323	1,040
342	0,141	322	1,110
342	0,112	322	1,170
343	0,096	321	1,240
344	0,083	320	1,300
345	0,073	319	1,360
346	0,067	319	1,430
347	0,058	318	1,500
348	0,055	317	1,580
348	0,051	316	1,670
349	0,045	316	1,750
350	0,044	315	1,840
351	0,039	314	1,930
351	0,037	314	2,030
352	0,037	313	2,120
353	0,032	312	2,220
353	0,033	312	2,330
354	0,031	311	2,430
358	0,023	310	2,540
358	0,025	310	2,660
359	0,023	309	2,770
359	0,022	308	2,910
---	---	306	3,470

Table S7. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 0.5 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	6,780	357	0,024
298	6,700	358	0,024
298	6,620	358	0,025
298	6,440	359	0,021
299	6,120	360	0,023
300	5,760	360	0,022
301	5,500	359	0,020
302	5,180	359	0,023
303	4,910	357	0,022
304	4,670	356	0,021
305	4,420	355	0,024
306	4,170	354	0,022
307	3,930	353	0,023
308	3,680	352	0,025
309	3,450	351	0,022
310	3,230	350	0,025
311	3,000	349	0,025
312	2,780	348	0,024
313	2,550	347	0,027
314	2,340	346	0,027
315	2,130	345	0,027

316	1,930	344	0,030
317	1,760	343	0,027
318	1,590	342	0,029
319	1,440	341	0,031
320	1,310	340	0,029
321	1,190	339	0,032
322	1,070	338	0,033
323	0,974	337	0,031
324	0,880	336	0,036
325	0,791	335	0,036
326	0,711	334	0,037
327	0,632	333	0,045
328	0,569	332	0,052
328	0,507	331	0,078
329	0,453	331	0,147
330	0,408	330	0,249
331	0,361	329	0,360
332	0,323	328	0,464
333	0,290	327	0,558
334	0,257	326	0,634
335	0,229	325	0,694
336	0,202	325	0,747
337	0,176	324	0,798
337	0,161	323	0,846
338	0,138	322	0,900
339	0,123	321	0,954
340	0,110	321	1,010
341	0,096	320	1,070
342	0,087	319	1,130
343	0,079	318	1,180
343	0,070	318	1,250
344	0,067	317	1,310
345	0,061	316	1,380
346	0,055	316	1,460
347	0,054	315	1,530
348	0,048	314	1,610
348	0,044	313	1,690
349	0,045	313	1,770
350	0,039	312	1,860
351	0,038	311	1,950
351	0,038	311	2,040
352	0,033	310	2,150
353	0,034	309	2,240
353	0,032	309	2,350
---	---	308	2,340
---	---	308	2,440
---	---	307	2,550
---	---	306	2,670
---	---	306	2,790
---	---	305	2,930
---	---	305	3,060
---	---	304	3,170
---	---	304	3,250

Table S8. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 0.5 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
308	2,470	357	0,021
308	2,580	358	0,024
307	2,710	359	0,022
306	2,830	359	0,019
306	2,960	359	0,022
305	3,100	359	0,021
305	3,230	359	0,020
304	3,360	358	0,023
304	3,460	356	0,021
303	3,470	355	0,021
304	3,390	354	0,024
305	3,220	353	0,021
306	3,020	352	0,024
307	2,830	351	0,024
308	2,620	350	0,022
309	2,410	349	0,026
310	2,230	348	0,024
312	2,040	347	0,024
313	1,860	346	0,027
314	1,700	345	0,025
315	1,530	344	0,026
316	1,390	343	0,028
317	1,250	342	0,026
318	1,130	341	0,028
319	1,020	340	0,029
320	0,922	339	0,027
321	0,833	338	0,031
322	0,759	338	0,030
323	0,689	337	0,030
324	0,627	336	0,034
324	0,575	335	0,032
325	0,524	334	0,032
326	0,480	333	0,036
327	0,444	332	0,034
328	0,407	331	0,038
329	0,377	330	0,045
330	0,350	329	0,069
331	0,322	329	0,124
332	0,302	328	0,204
333	0,281	327	0,318
334	0,260	326	0,432
335	0,244	325	0,529
336	0,226	324	0,612
336	0,207	324	0,680
337	0,196	323	0,727
338	0,183	322	0,773
339	0,159	321	0,818
340	0,134	320	0,863
341	0,110	320	0,907

342	0,094	319	0,956
343	0,082	318	1,000
343	0,070	318	1,060
344	0,066	317	1,110
345	0,059	316	1,170
346	0,052	315	1,230
347	0,051	315	1,280
348	0,044	314	1,350
348	0,041	313	1,410
349	0,043	313	1,480
350	0,036	312	1,550
351	0,036	311	1,620
351	0,034	311	1,700
---	---	310	1,770
---	---	309	1,850
---	---	309	1,940

Table S9. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 1.0 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	10,400	360	0,025
298	10,400	359	0,024
298	10,200	358	0,024
299	9,590	357	0,026
300	9,080	355	0,024
301	8,720	354	0,025
302	8,310	353	0,027
303	7,890	352	0,025
304	7,420	351	0,027
305	7,020	350	0,026
306	6,750	349	0,027
307	6,520	348	0,029
308	6,180	347	0,027
309	5,910	346	0,029
310	5,560	345	0,030
311	5,200	344	0,029
312	4,860	343	0,032
313	4,480	342	0,031
314	4,150	341	0,032
315	3,800	340	0,034
316	3,480	339	0,033
317	3,160	338	0,036
318	2,870	337	0,036
319	2,610	336	0,036
320	2,370	335	0,040
321	2,150	334	0,040
322	1,950	334	0,044
323	1,760	333	0,051
324	1,580	332	0,066
325	1,410	331	0,128
325	1,260	330	0,266
326	1,120	329	0,446

327	0,993	328	0,625
328	0,884	327	0,792
329	0,784	327	0,932
330	0,693	326	1,040
331	0,616	325	1,120
332	0,542	324	1,200
333	0,479	323	1,270
334	0,422	323	1,340
334	0,366	322	1,410
335	0,321	321	1,490
336	0,276	320	1,560
337	0,238	320	1,640
338	0,208	319	1,730
339	0,177	318	1,820
340	0,155	317	1,920
341	0,136	317	2,010
341	0,118	316	2,120
342	0,106	315	2,220
343	0,093	315	2,340
344	0,084	314	2,450
345	0,077	313	2,570
346	0,067	312	2,700
347	0,063	312	2,830
347	0,057	311	2,960
348	0,052	310	3,100
349	0,050	310	3,250
350	0,045	309	3,400
350	0,044	309	3,560
351	0,042	308	3,730
352	0,037	307	3,880
352	0,038	307	4,050
353	0,035	306	4,230
354	0,034	305	4,420
358	0,028	305	4,610
358	0,025	304	4,790
359	0,025	304	4,950
359	0,026	306	4,300
360	0,022	306	4,520
---	---	305	4,710
---	---	305	4,920
---	---	304	5,090
---	---	304	5,200

Table S10. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 1.0 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
304	5,020	359	0,024
304	4,970	359	0,022
304	4,800	358	0,024
306	4,570	357	0,024
307	4,320	356	0,023
308	4,060	355	0,025

309	3,790	354	0,024
310	3,540	353	0,025
311	3,290	352	0,026
312	3,040	351	0,024
313	2,800	350	0,027
314	2,560	349	0,027
315	2,340	348	0,026
316	2,130	347	0,028
317	1,940	346	0,027
318	1,760	345	0,029
319	1,600	344	0,030
320	1,450	343	0,029
321	1,320	342	0,031
322	1,200	341	0,031
323	1,090	340	0,031
324	0,997	339	0,033
325	0,909	338	0,032
326	0,828	337	0,034
327	0,758	336	0,035
328	0,693	335	0,034
329	0,636	334	0,037
330	0,586	333	0,036
331	0,538	332	0,038
332	0,498	331	0,040
333	0,460	331	0,042
334	0,428	330	0,060
334	0,401	329	0,102
335	0,373	328	0,189
336	0,350	327	0,328
337	0,328	326	0,490
338	0,302	326	0,651
339	0,280	325	0,797
340	0,236	324	0,917
341	0,184	323	1,010
342	0,145	322	1,080
342	0,117	322	1,150
343	0,101	321	1,210
344	0,085	320	1,270
345	0,074	319	1,340
346	0,068	319	1,410
347	0,059	318	1,480
347	0,055	317	1,560
348	0,051	316	1,640
349	0,045	316	1,710
350	0,045	315	1,800
351	0,040	314	1,890
351	0,038	314	1,990
352	0,037	313	2,080
353	0,032	312	2,180
353	0,033	312	2,280
354	0,031	311	2,380
355	0,029	310	2,490
355	0,029	310	2,610

356	0,026	309	2,730
356	0,027	308	2,860
357	0,026	306	3,410
358	0,023	303	5,650

Table S11. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 1.0 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	6,850	357	0,025
298	6,805	358	0,025
298	6,665	358	0,026
298	6,550	359	0,022
299	6,320	359	0,024
300	5,990	360	0,024
301	5,670	360	0,021
302	5,320	359	0,025
303	5,040	358	0,023
304	4,765	356	0,022
305	4,490	355	0,026
306	4,235	354	0,023
307	3,990	353	0,025
308	3,735	352	0,027
309	3,510	351	0,024
310	3,250	350	0,027
311	3,025	349	0,027
312	2,790	348	0,025
313	2,560	347	0,029
314	2,345	346	0,028
315	2,145	345	0,027
316	1,955	344	0,031
317	1,730	343	0,029
318	1,590	342	0,030
319	1,430	341	0,032
320	1,310	340	0,030
321	1,220	339	0,034
322	1,110	338	0,034
323	1,020	337	0,033
324	0,925	336	0,037
325	0,841	335	0,037
326	0,769	334	0,038
327	0,694	333	0,045
327	0,630	332	0,048
328	0,570	332	0,067
329	0,515	331	0,114
330	0,470	330	0,205
331	0,425	329	0,325
332	0,381	328	0,441
333	0,344	327	0,547
334	0,304	326	0,635
335	0,274	326	0,698
336	0,241	325	0,751
336	0,210	324	0,801

337	0,187	323	0,846
338	0,163	322	0,896
339	0,142	322	0,948
340	0,128	321	0,999
341	0,111	320	1,060
342	0,100	319	1,120
342	0,091	319	1,180
343	0,080	318	1,240
344	0,075	317	1,300
345	0,068	316	1,370
346	0,061	316	1,450
347	0,059	315	1,520
348	0,053	314	1,590
348	0,049	314	1,670
349	0,049	313	1,750
350	0,043	312	1,840
351	0,041	312	1,920
351	0,040	311	2,010
352	0,035	310	2,110
353	0,036	310	2,210
353	0,034	309	2,310
---	---	308	2,430
---	---	308	2,530
---	---	307	2,650
---	---	307	2,770
---	---	306	2,880
---	---	305	3,010
---	---	305	3,140
---	---	304	3,260
---	---	304	3,350

Table S12. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 1.0 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
308	2,430	357	0,023
308	2,530	358	0,024
307	2,650	358	0,024
307	2,770	359	0,021
306	2,880	359	0,024
305	3,010	359	0,023
305	3,140	358	0,022
304	3,260	357	0,025
304	3,350	356	0,023
304	3,380	354	0,023
304	3,310	353	0,026
305	3,170	352	0,023
306	2,980	351	0,026
307	2,780	350	0,026
308	2,590	349	0,024
309	2,390	348	0,028
310	2,200	347	0,026

311	2,010	347	0,026
312	1,830	346	0,029
313	1,670	345	0,027
314	1,520	344	0,028
315	1,370	343	0,031
317	1,240	342	0,028
318	1,120	341	0,031
319	1,010	340	0,031
319	0,915	339	0,029
320	0,826	338	0,033
321	0,753	337	0,032
322	0,683	336	0,032
323	0,621	335	0,036
324	0,571	334	0,034
325	0,520	333	0,035
326	0,477	332	0,038
327	0,441	331	0,036
328	0,404	330	0,041
329	0,374	330	0,052
330	0,348	329	0,077
331	0,320	328	0,132
332	0,300	327	0,213
333	0,280	326	0,322
334	0,259	325	0,438
335	0,245	325	0,537
335	0,226	324	0,618
336	0,208	323	0,680
337	0,196	322	0,721
338	0,178	321	0,765
339	0,163	321	0,808
340	0,142	320	0,848
341	0,117	319	0,897
342	0,101	318	0,941
342	0,087	318	0,991
343	0,075	317	1,050
344	0,070	316	1,100
345	0,062	316	1,160
346	0,055	315	1,220
347	0,053	314	1,280
348	0,046	314	1,350
348	0,043	313	1,410
349	0,042	312	1,480
350	0,036	312	1,550
351	0,037	311	1,610
351	0,035	310	1,680
352	0,031	310	1,770
353	0,033	309	1,840
353	0,030	308	1,930

Table S13. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 2.0 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	11,300	360	0,025
298	11,200	360	0,025
298	11,100	359	0,024
298	10,900	358	0,026
299	10,400	356	0,025
300	9,840	355	0,026
301	9,350	354	0,027
302	8,870	353	0,025
303	8,400	352	0,028
304	7,950	351	0,027
305	7,570	350	0,028
306	7,110	349	0,030
307	6,730	348	0,028
308	6,360	347	0,030
309	5,980	346	0,031
310	5,600	345	0,030
311	5,240	344	0,033
312	4,860	343	0,032
313	4,510	342	0,033
314	4,150	341	0,035
315	3,820	340	0,034
316	3,490	339	0,037
317	3,190	338	0,037
318	2,910	337	0,037
319	2,630	336	0,040
320	2,390	335	0,040
321	2,170	334	0,044
322	1,950	333	0,048
323	1,770	332	0,053
324	1,590	332	0,076
325	1,430	331	0,146
326	1,280	330	0,306
326	1,140	329	0,493
327	1,020	328	0,671
328	0,913	327	0,835
329	0,814	327	0,962
330	0,730	326	1,060
331	0,650	325	1,150
332	0,579	324	1,220
333	0,516	323	1,300
334	0,451	323	1,370
335	0,398	322	1,440
335	0,345	321	1,510
336	0,300	320	1,590
337	0,260	319	1,670
338	0,222	319	1,760
339	0,193	318	1,850

340	0,168	317	1,940
341	0,144	317	2,040
342	0,128	316	2,140
342	0,111	315	2,250
343	0,099	314	2,350
344	0,090	314	2,460
345	0,079	313	2,590
346	0,074	312	2,710
347	0,066	312	2,840
347	0,060	311	2,970
348	0,057	310	3,110
349	0,051	310	3,250
350	0,048	309	3,390
351	0,046	308	3,560
351	0,041	308	3,700
352	0,041	307	3,860
353	0,038	307	4,030
353	0,036	306	4,200
354	0,036	305	4,380
355	0,032	305	4,570
355	0,032	304	4,730
356	0,031	304	4,870
356	0,028	---	---
357	0,030	---	---
358	0,026	---	---
358	0,026	---	---
359	0,027	---	---
359	0,023	---	---

Table S14. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 2.0 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 60 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
304	4,920	359	0,026
304	4,850	359	0,024
305	4,690	358	0,026
306	4,440	357	0,026
307	4,190	356	0,025
308	3,940	355	0,027
309	3,670	354	0,026
310	3,440	353	0,026
311	3,190	352	0,028
312	2,940	351	0,026
314	2,720	350	0,029
315	2,490	349	0,028
316	2,290	348	0,028
317	2,090	347	0,031
318	1,900	346	0,029
319	1,730	345	0,030
320	1,570	344	0,032
321	1,430	343	0,030
322	1,310	342	0,033
323	1,190	341	0,032

323	1,080	340	0,033
324	0,987	339	0,035
325	0,900	338	0,033
326	0,827	337	0,035
327	0,754	336	0,036
328	0,694	335	0,035
329	0,638	334	0,038
330	0,585	333	0,037
331	0,544	332	0,039
332	0,502	331	0,041
333	0,465	331	0,042
334	0,435	330	0,056
335	0,405	329	0,091
336	0,383	328	0,159
336	0,362	327	0,274
337	0,340	326	0,428
338	0,314	326	0,605
339	0,275	325	0,773
340	0,248	324	0,910
341	0,202	323	1,010
342	0,154	322	1,090
343	0,129	322	1,150
343	0,106	321	1,210
344	0,089	320	1,270
345	0,081	319	1,330
346	0,070	319	1,400
347	0,064	318	1,470
348	0,059	317	1,550
348	0,052	316	1,640
349	0,051	316	1,720
350	0,045	315	1,810
351	0,043	314	1,890
351	0,042	314	1,980
352	0,037	313	2,090
353	0,037	312	2,190
353	0,035	312	2,290
354	0,032	311	2,390
355	0,033	310	2,500
355	0,029	310	2,620
356	0,029	309	2,730
357	0,029	308	2,860
357	0,026	306	3,430
358	0,028	303	5,700
358	0,026	300	9,860

Table S15. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 2.0 wt.% Fe NPs during first run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
298	6,920	360	0,026
298	6,910	359	0,023
298	6,710	359	0,027
298	6,660	357	0,025

299	6,520	356	0,024
300	6,220	355	0,027
301	5,840	354	0,024
302	5,460	353	0,026
303	5,170	352	0,028
304	4,860	351	0,025
305	4,560	350	0,028
306	4,300	349	0,028
307	4,050	348	0,026
308	3,790	347	0,030
309	3,570	346	0,029
310	3,270	345	0,029
311	3,050	344	0,032
312	2,800	343	0,030
313	2,570	342	0,031
314	2,350	341	0,033
315	2,160	340	0,031
316	1,980	339	0,035
317	1,770	338	0,035
318	1,590	337	0,034
319	1,460	336	0,038
320	1,350	335	0,037
321	1,230	334	0,038
322	1,120	333	0,044
323	1,020	332	0,046
324	0,919	332	0,060
325	0,843	331	0,091
326	0,765	330	0,153
327	0,696	329	0,269
328	0,633	328	0,394
329	0,571	327	0,512
329	0,521	326	0,611
330	0,476	326	0,680
331	0,431	325	0,736
332	0,393	324	0,782
333	0,358	323	0,825
334	0,322	322	0,870
335	0,289	322	0,918
336	0,258	321	0,962
337	0,227	320	1,010
337	0,202	319	1,070
338	0,176	319	1,120
339	0,154	318	1,180
340	0,137	317	1,240
341	0,118	316	1,300
342	0,105	316	1,370
343	0,096	315	1,440
343	0,084	314	1,510
344	0,079	314	1,580
345	0,072	313	1,650
346	0,065	312	1,740
347	0,065	312	1,810
348	0,057	311	1,900

348	0,053	310	1,990
349	0,054	310	2,080
350	0,048	309	2,170
351	0,046	308	2,280
351	0,045	308	2,370
352	0,039	307	2,480
353	0,040	306	2,590
353	0,038	306	2,690
---	---	305	2,810
---	---	305	2,930
---	---	304	3,040
---	---	304	3,120

Table S16. Experimental data of the performed viscosity measurements of the flux with 2.0 wt.% Fe NPs during second run at the shear rate of 100 s⁻¹.

Temperature, K	Viscosity, Pa s	Temperature, K	Viscosity, Pa s
first heating		first cooling	
308	2,280	357	0,023
308	2,370	358	0,025
307	2,480	359	0,025
306	2,590	359	0,022
306	2,690	360	0,025
305	2,810	359	0,023
305	2,930	359	0,022
304	3,040	358	0,026
304	3,120	356	0,023
304	3,130	355	0,024
304	3,080	354	0,026
305	2,960	353	0,024
306	2,790	352	0,026
307	2,610	351	0,027
308	2,420	350	0,025
309	2,230	349	0,028
310	2,060	348	0,027
311	1,890	347	0,026
313	1,730	346	0,030
314	1,580	345	0,028
315	1,430	344	0,029
316	1,300	343	0,032
317	1,180	342	0,029
318	1,060	341	0,032
319	0,961	341	0,032
320	0,871	340	0,030
321	0,787	339	0,034
322	0,719	338	0,033
323	0,652	337	0,033
324	0,593	336	0,037
324	0,546	335	0,035
325	0,496	334	0,036
326	0,455	333	0,039
327	0,421	332	0,036
328	0,387	331	0,040
329	0,359	330	0,043

330	0,334	329	0,050
331	0,309	329	0,078
332	0,290	328	0,125
333	0,271	327	0,208
334	0,251	326	0,326
335	0,237	325	0,438
336	0,219	324	0,540
336	0,202	324	0,621
337	0,190	323	0,674
338	0,172	322	0,719
339	0,157	321	0,759
340	0,136	321	0,798
341	0,112	320	0,843
342	0,098	319	0,884
343	0,086	318	0,930
344	0,073	318	0,983
344	0,069	317	1,030
345	0,061	316	1,090
346	0,053	316	1,140
347	0,052	315	1,200
348	0,044	314	1,270
349	0,041	313	1,330
349	0,040	313	1,390
350	0,034	312	1,460
351	0,035	311	1,530
351	0,034	311	1,600
352	0,029	310	1,680
353	0,032	309	1,750
354	0,029	309	1,830

DTA test

The DTA test of the flux was performed using Pegasus STA 449C (Figure S2).

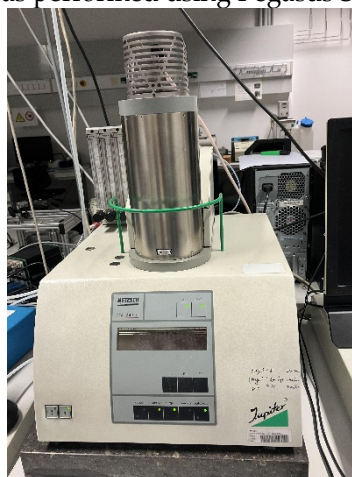


Figure S2. DTA measurement equipment.

The measured data are presented in Table S17.

Table S17. Experimental data of the performed DTA analysis of the commercial flux.

Time, sec	Temperature, K	Heat flow, μV
	first heating	

0	304	-0,92
15	304	-0,92
30	304	-0,92
45	304	-0,95
60	304	-1,03
75	304	-1,16
90	304	-1,29
105	305	-1,42
120	306	-1,52
135	306	-1,60
150	307	-1,65
165	308	-1,67
180	309	-1,67
195	311	-1,65
210	312	-1,61
225	313	-1,58
240	315	-1,52
255	316	-1,46
270	318	-1,41
285	319	-1,36
300	321	-1,29
315	323	-1,23
330	324	-1,14
345	326	-1,00
360	328	-0,93
375	329	-0,91
390	331	-0,95
405	333	-1,02
420	334	-1,10
435	336	-1,16
450	338	-1,24
465	339	-1,32
480	341	-1,43
495	342	-1,56
510	344	-1,72
525	345	-1,88
540	347	-2,05
555	348	-2,20
570	350	-2,35
585	351	-2,50
600	353	-2,63
615	354	-2,76
630	356	-2,88
645	357	-3,00
660	358	-3,11
675	360	-3,19
690	361	-3,30
705	362	-3,40
720	363	-3,48
735	365	-3,55
750	366	-3,53
765	367	-3,43
780	367	-3,26

795	368	-3,08
810	368	-2,88
825	368	-2,68
840	368	-2,48
First cooling		
855	368	-2,28
870	368	-2,09
885	368	-1,89
900	367	-1,72
915	367	-1,55
930	366	-1,38
945	365	-1,24
960	365	-1,10
975	364	-0,99
990	363	-0,88
1005	362	-0,79
1020	362	-0,71
1035	361	-0,64
1050	360	-0,59
1065	359	-0,54
1080	358	-0,50
1095	357	-0,48
1110	356	-0,44
1125	355	-0,42
1140	354	-0,40
1155	354	-0,39
1170	353	-0,38
1185	352	-0,36
1200	351	-0,35
1215	350	-0,35
1230	349	-0,35
1245	348	-0,34
1260	347	-0,34
1275	346	-0,33
1290	346	-0,33
1305	345	-0,32
1320	344	-0,31
1335	343	-0,32
1350	342	-0,31
1365	342	-0,31
1380	341	-0,30
1395	340	-0,29
1410	339	-0,29
1425	339	-0,28
1440	338	-0,29
1455	337	-0,29
1470	336	-0,28
1485	336	-0,28
1500	335	-0,31
1515	334	-0,35
1530	334	-0,44
1545	333	-0,53
1560	333	-0,61

1575	332	-0,67
1590	331	-0,71
1605	331	-0,75
1620	330	-0,77
1635	330	-0,79
1650	329	-0,81
1665	329	-0,82
1680	328	-0,82
1695	328	-0,83
1710	327	-0,83
1725	327	-0,84
1740	326	-0,84
1755	326	-0,85
1770	325	-0,85
1785	325	-0,85
1800	324	-0,85
1815	324	-0,85
1830	323	-0,85
1845	323	-0,85
1860	323	-0,85
1875	322	-0,85
1890	322	-0,85
1905	321	-0,85
1920	321	-0,85
1935	321	-0,85
1950	320	-0,85
1965	320	-0,85
1980	320	-0,85
1995	319	-0,85
2010	319	-0,86
2025	319	-0,86
2040	318	-0,86
2055	318	-0,86
2070	318	-0,87
2085	317	-0,86
2100	317	-0,88
2115	317	-1,00
Second heating		
2130	317	-1,30
2145	318	-1,63
2160	319	-1,90
2175	321	-2,04
2190	322	-2,04
2205	324	-1,92
2220	326	-1,77
2235	328	-1,61
2250	330	-1,48
2265	332	-1,37
2280	333	-1,30
2295	335	-1,27
2310	336	-1,26
2325	337	-1,27
2340	338	-1,29

2355	339	-1,32
2370	340	-1,36
2385	340	-1,39
2400	341	-1,42
2415	341	-1,43
2430	341	-1,43
2445	341	-1,43
2460	341	-1,40
2475	341	-1,36
Second cooling		
2475	341	-1,36
2490	341	-1,32
2505	341	-1,26
2520	341	-1,20
2535	340	-1,14
2550	340	-1,07
2565	340	-1,01
2580	339	-0,94
2595	339	-0,88
2610	338	-0,82
2625	338	-0,76
2640	338	-0,71
2655	337	-0,67
2670	337	-0,64
2685	336	-0,61
2700	336	-0,59
2715	335	-0,58
2730	335	-0,60
2745	334	-0,62
2760	334	-0,65
2775	333	-0,68
2790	333	-0,71
2805	332	-0,73
2820	332	-0,75
2835	331	-0,77
2850	331	-0,78
2865	330	-0,79
2880	330	-0,80
